

ISABEL FRANCO DO LAGO

INTEGRAÇÃO GPS E GLONASS APLICADA AOS LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Orientadores:

Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira

Prof.^a Dr.^a Cláudia Pereira Krueger

CURITIBA
2001

“INTEGRAÇÃO GPS E GLONASS APLICADA AOS LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS”

POR

ISABEL FRANCO DO LAGO

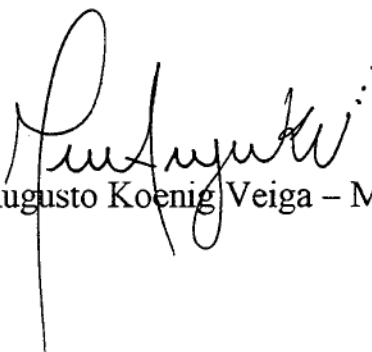
Dissertação nº 154 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira (UFPR)
Orientador e Presidente



Prof. Dr. Ricardo Ernesto Schaal - Membro (USP/SC)



Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga – Membro (UFPR)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE GRÁFICOS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 HISTÓRICO DOS SISTEMAS GPS E GLONASS.....	1
1.2 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL.....	5
2.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL GPS E GLONASS ..	5
2.2 ESTRUTURA DOS SINAIS.....	9
2.3 TÉCNICAS DE SEGURANÇA.....	11
2.4 FORMATO E CONTEÚDO DAS MENSAGENS.....	13
2.4.1 Mensagem de Navegação do GPS.....	14
2.4.2 Mensagem de Navegação do GLONASS.....	15
2.5 SISTEMAS DE TEMPO.....	16
2.6 SISTEMAS DE REFERÊNCIA.....	17
2.7 PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE O WGS-84 E O PZ-90.....	19
2.8 CAMPANHA IGEX.....	21
2.9 EFEMÉRIDES.....	22
3 MÉTODOS E MODELOS MATEMÁTICOS.....	25
3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE MEDIÇÃO.....	27
3.1.1 Medidas de pseudo-distância.....	28
3.1.2 Medidas com a fase da portadora.....	30
3.1.3 Precisão dos Métodos.....	31
3.2 COMBINAÇÕES LINEARES DE OBSERVAÇÕES.....	32
3.2.1 Modelos Matemáticos para as Observações Fundamentais.....	33
3.2.2 Simples Diferenças de Observações para os Sistemas GPS e GLONASS.....	33
3.2.3 Duplas Diferenças de Observações para os Sistemas GPS e GLONASS.....	34
3.2.4 Soluções para a Dupla Diferença de Fase do GLONASS.....	35
3.2.4.1 Métodos que eliminam os erros dos relógios dos receptores.....	35
3.2.4.2 Métodos que estimam os erros dos relógios dos receptores.....	37
3.2.4.3 Estimativa aproximada da ambigüidade.....	38
3.2.5 Tripla Diferença de Observações.....	40
3.2.6 Combinação Linear entre as Fases.....	40
3.2.6.1 Combinação linear <i>wide lane</i>	41
3.2.6.2 Combinação linear <i>narrow lane</i>	41
3.2.6.3 Combinação linear livre do atraso ionosférico.....	41
3.2.7 Determinação das Ambigüidades.....	42
3.2.7.1 Técnicas para resolução das ambigüidades.....	43
3.3 AVALIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DOS SATÉLITES (DOP).....	46
3.4 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO.....	47
3.4.1 Posicionamento Absoluto.....	48
3.4.2 Posicionamento Relativo.....	49
3.4.2.1 Levantamento estático clássico.....	49
4 LEVANTAMENTOS DE CAMPO E PROGRAMA DE PROCESSAMENTO.....	51

4.1	DESCRIÇÃO DO LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS.....	51
4.2	POSICIONAMENTO ABSOLUTO	52
4.3	POSICIONAMENTO RELATIVO.....	54
4.4	CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS EMPREGADOS.....	56
4.5	PROGRAMA DE PROCESSAMENTO.....	58
4.5.1	Como Criar ou Selecionar um Projeto	58
4.5.2	Importação de Dados.....	60
4.5.3	Processamento dos Dados	61
4.5.5	Geração dos Relatórios dos Processamentos	62
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	65
5.1	ANÁLISE DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO	65
5.1.1	Posicionamento Absoluto contendo um arquivo de dados de 12 horas.....	66
5.1.2	– Posicionamento Absoluto contendo Todos os Arquivos de Dados.....	80
5.2	ANÁLISE DO POSICIONAMENTO RELATIVO.....	84
5.2.2	Processamento com a portadora L1	88
5.2.3	Processamento com códigos C/A e P	90
5.2.4	Comparação entre os resultados obtidos nas linhas de base RM03-RM01 e RM03-RM02	93
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	95
6.1	CONCLUSÕES	95
6.2	RECOMENDAÇÕES	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que nos permite enfrentar os desafios e desfrutar cada dia;

Agradeço aos meus pais, Silvia e Izautino, pela educação recebida, pelo apoio em todos os momentos;

Aos meus irmãos David e Hiran, pelas palavras de incentivo nos momentos difíceis;

Ao professor Dr. Marcelo Carvalho dos Santos, pela sugestão do tema e orientação no início deste trabalho;

Ao professor Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira, pela continuidade na orientação, esclarecimentos e sugestões durante o desenvolvimento do trabalho;

À professora Dra. Cláudia Pereira Krueger pelas sugestões relativas à parte experimental do trabalho;

Ao Engenheiro Cartógrafo Pedro Merege Filho, pelo auxílio prestado com o programa de processamento de dados;

À Universidade Federal do Paraná, através do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas pela oportunidade de frequentar o curso de mestrado e também pelo uso de suas instalações e laboratórios;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo;

Às empresas SightGPS e Datum Ltda pelo empréstimo dos equipamentos utilizados na parte experimental do trabalho;

Aos professores do Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pelos conhecimentos transmitidos;

Aos colegas de curso, pelo companheirismo, discussões sobre os diversos temas técnicos e amizade em todos os momentos;

Aos verdadeiros amigos que tive a oportunidade de conhecer e que sempre estiveram presentes com palavras de apoio e incentivo, nos momentos certos;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CONFIGURAÇÃO DOS SATÉLITES GPS.....	6
FIGURA 2.2 – CONFIGURAÇÃO DOS SATÉLITES GLONASS	6
FIGURA 2.3 – SEGMENTO DE CONTROLE DO GPS	7
FIGURA 2.4 – SEGMENTO DE CONTROLE DO GLONASS.....	8
FIGURA 2.5 – MODULAÇÃO BIFÁSICA	10
FIGURA 3.1 – PRINCÍPIO BÁSICO DO POSICIONAMENTO COM GPS E GLONASS	28
FIGURA 3.2 – CONTADOR CIRCULAR DE FASE	42
FIGURA 3.3 – MEDIDA CONTÍNUA DA FASE À PARTIR DO INSTANTE t_0	43
FIGURA 3.4 – REPRESENTAÇÃO DO PDOP	47
FIGURA 3.5 – MÉTODOS E TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO.....	48
FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS NOS LEVANTAMENTOS	52
FIGURA 4.2 – ANTENA JPS LEGANT	57
FIGURA 4.3 – RECEPTOR LEGACY	58
FIGURA 4.4 – JANELA DE SELEÇÃO DE PROJETOS.....	59
FIGURA 4.5 – JANELA DE DADOS BRUTOS, SOLUÇÕES E AJUSTAMENTOS.	59
FIGURA 4.6 – JANELA DE IMPORTAÇÃO DE DADOS	60
FIGURA 4.7 – OPÇÕES DE PROCESSAMENTO	61
FIGURA 4.8 – FIXANDO UMA ESTAÇÃO COMO REFERÊNCIA.....	62
FIGURA 4.9 – OPÇÕES DE GERAÇÃO DE RELATÓRIOS	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – COMPARAÇÃO ENTRE GPS E GLONASS	8
TABELA 2.2 – INTERVALOS DE FREQUÊNCIA UTILIZADOS PELO GLONASS	11
TABELA 2.3 – CARACTERÍSTICAS DO SERVIÇO DE POSICIONAMENTO PADRÃO DO GPS	12
TABELA 2.4 – CARACTERÍSTICAS DO SERVIÇO DE POSICIONAMENTO PRECISO DO GPS	12
TABELA 2.5 – CONSTANTES DEFINIDORAS DO WGS-84 E DO PZ-90.....	18
TABELA 2.6 – SEGMENTO DE ARQUIVO DE NAVEGAÇÃO GPS.....	23
TABELA 2.7 – SEGMENTO DE ARQUIVO DE NAVEGAÇÃO GLONASS	24
TABELA 2.8 – SEGMENTO DE ARQUIVO DE OBSERVAÇÃO GPS/GLONASS.....	25
TABELA 4.1 – COORDENADAS (WGS-84) DAS ESTAÇÕES LOCALIZADAS NA ÁREA TESTE	52
TABELA 4.2 – STATUS DA CONSTELAÇÃO GLONASS EM 6 DE MAIO DE 2000.....	55
TABELA 4.3 – STATUS DA CONSTELAÇÃO GLONASS EM 30 DE AGOSTO DE 2000	55
TABELA 4.4 – STATUS DA CONSTELAÇÃO GLONASS EM 9 DE JANEIRO DE 2001.....	55
TABELA 4.5 – CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO EMPREGADO	56
TABELA 4.6 – COORDENADAS INSTANTÂNEAS OBTIDAS DO PROCESSAMENTO	63
TABELA 4.7 – COORDENADAS FINAIS OBTIDAS DE PROCESSAMENTO	64
TABELA 5.1 - RESULTADOS DO PROCESSAMENTO COM DADOS GLONASS.....	73
TABELA 5.2 - COORDENADAS FINAIS OBTIDAS NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO.....	80
TABELA 5.3 - DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS DE REFERÊNCIA E AS FINAIS	80
TABELA 5.4 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, UTILIZANDO AS PORTADORAS L1 E L2	85
TABELA 5.5 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, UTILIZANDO AS PORTADORAS L1 E L2	85
TABELA 5.6 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM AS PORTADORAS L1 E L2	86
TABELA 5.7 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM AS PORTADORAS L1 E L2	86
TABELA 5.8 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, UTILIZANDO A PORTADORA L1	88
TABELA 5.9 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, UTILIZANDO A PORTADORA L1	88
TABELA 5.10 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM A PORTADORA L1	88
TABELA 5.11 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM A PORTADORA L1	88
TABELA 5.12 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, UTILIZANDO OS CÓDIGOS C/A E P91	91
TABELA 5.13 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, UTILIZANDO OS CÓDIGOS C/A E P91	91
TABELA 5.14 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM OS CÓDIGOS C/A E P	91
TABELA 5.15 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM OS CÓDIGOS C/A E P	91

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1 - ERRO BIDIMENSIONAL OBTIDO NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO COM DADOS GPS/GLONASS.....	67
GRÁFICO 5.2 - ERRO TRIDIMENSIONAL OBTIDO NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO COM DADOS GPS/ GLONASS.....	67
GRÁFICO 5.3 - VARIAÇÃO DO ERRO BIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO PDOP OBTIDO PARA DADOS GPS/GLONASS.....	67
GRÁFICO 5.6 - DIFERENÇAS DE LATITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS/GLONASS	70
GRÁFICO 5.7 - DIFERENÇAS DE LONGITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS/GLONASS.....	70
GRÁFICO 5.8 - DIFERENÇAS DE ALTITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS/GLONASS	71
GRÁFICO 5.9 - DIFERENÇAS DE LATITUDE OBTIDAS COM DADOS GLONASS	71
GRÁFICO 5.10 - DIFERENÇAS DE LONGITUDE OBTIDAS COM DADOS GLONASS.....	72
GRÁFICO 5.11 - DIFERENÇAS DE ALTITUDE OBTIDAS COM DADOS GLONASS	72
GRÁFICO 5.12 - CLASSES DE ERROS BIDIMENSIONAIS PARA DADOS GLONASS.....	74
GRÁFICO 5.13 - CLASSES DE ERROS TRIDIMENSIONAIS PARA DADOS GLONASS	74
GRÁFICO 5.14 - ERRO TRIDIMENSIONAL OBTIDO COM DADOS GLONASS.....	75
GRÁFICO 5.15 - DIFERENÇAS DE LATITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS	76
GRÁFICO 5.16 - DIFERENÇAS DE LONGITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS	76
GRÁFICO 5.17 - DIFERENÇAS DE ALTITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS.....	77
GRÁFICO 5.18 - CLASSES DE ERROS BIDIMENSIONAIS PARA DADOS GPS	77
GRÁFICO 5.19 - CLASSES DE ERROS BIDIMENSIONAIS PARA DADOS GPS	78
GRÁFICO 5.20 - DISPERSÃO EM FUNÇÃO DAS DIFERENÇAS EM LATITUDE E LONGITUDE COM DADOS GPS/GLONASS.....	78
GRÁFICO 5.21 - DISPERSÃO EM FUNÇÃO DAS DIFERENÇAS EM LATITUDE E LONGITUDE COM DADOS GLONASS.....	79
GRÁFICO 5.22 - DISPERSÃO EM FUNÇÃO DAS DIFERENÇAS EM LATITUDE E LONGITUDE OBTIDA COM DADOS GPS.....	79
GRÁFICO 5.23 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE SATÉLITES, OBTIDO COM DADOS GLONASS	81
GRÁFICO 5.25 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE SATÉLITES, OBTIDO COM DADOS GPS	82
GRÁFICO 5.26 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO PDOP, OBTIDO COM DADOS GPS	83
GRÁFICO 5.27 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE SATÉLITES, OBTIDO COM DADOS GPS/GLONASS.....	83
GRÁFICO 5.28 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO PDOP, OBTIDO COM DADOS GPS/GLONASS	84
GRÁFICO 5.29 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM AS PORTADORAS L1 E L2 ...	87
GRÁFICO 5.30 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM AS PORTADORAS L1 E L2 ...	87
GRÁFICO 5.31 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM A PORTADORA L1	89
GRÁFICO 5.32 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM A PORTADORA L1	90
GRÁFICO 5.33 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM OS CÓDIGOS C/A e P	92
GRÁFICO 5.34 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM OS CÓDIGOS C/A E P	92

RESUMO

Tanto o NAVSTAR-GPS (*NAVigation System with Time And Ranging – Global Positioning System*) como o seu similar GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) oferecem uma poderosa ferramenta para a determinação de coordenadas de pontos na superfície terrestre. Deste modo, a realização deste trabalho objetiva o estudo dos aspectos envolvidos na compatibilização dos sistemas de posicionamento global GPS e GLONASS, no que se refere à sua aplicação aos levantamentos geodésicos. Para tal são abordados aspectos teóricos e práticos, considerados relevantes para o esclarecimento do tema. Dentro deste contexto, na parte teórica apresenta-se as principais características dos sistemas, ressaltando-se suas semelhanças e diferenças. Na parte prática são realizados diversos experimentos, subdivididos em posicionamentos absoluto e relativo. A metodologia de apresentação dos resultados visa a obtenção de uma análise quantitativa do desempenho proporcionado pelos sistemas GPS, GLONASS e GPS/GLONASS.

ABSTRACT

Both NAVSTAR-GPS (NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System) and its similar GLONASS (Global Navigation Satellite System) offers a powerful tool for the determination of coordinates of points in the terrestrial surface. This way, the accomplishment of this work objectifies the study of the aspects involved in the integration of these two global positioning systems, in what it refers to its application to the geodesic surveyings. The important theoretical and practical aspects are considered for the explain of the theme. In this context, the theoretical part we discuss the main characteristics of the systems, standing out the similarities and differences of the both. In the practical part several experiments are accomplished, subdivided in absolute and relative positionings. The methodology of presentation of the results seeks the obtaining of a quantitative analysis of the performance provided by the systems GPS, GLONASS and GPS/GLONASS.

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO DOS SISTEMAS GPS E GLONASS

A guerra fria ocorrida entre os Estados Unidos e a antiga União Soviética, durante décadas provocou não somente a corrida armamentista, mas criou também ambiente para a pesquisa de tecnologia espacial, com investimentos da ordem dos bilhões de dólares (SANTOS, 1998, p.45). O desenvolvimento dos sistemas de posicionamento por satélites ocorreu dentro deste contexto, no qual surgiram os sistemas GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano (DoD) e o GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), criado pela União Soviética como uma contrapartida ao GPS.

Inicialmente o GPS foi mais difundido entre a comunidade usuária, dada a disponibilidade de informações. No entanto os conhecimentos sobre o GLONASS, durante a década de 80, estiveram restritos a algumas características gerais das órbitas e frequências utilizadas para transmissão dos sinais. Somente após a dissolução da União Soviética as informações tornaram-se disponíveis, mediante a publicação do *Interface Control Document – ICD* (LANGLEY, 1997, p. 46).

Os sistemas GPS e GLONASS foram desenvolvidos com finalidades militares, sendo concebidos como concorrentes. Possuem características bastante semelhantes, tanto no que se refere aos aspectos orbitais, quanto àqueles de controle terrestre, fato que propicia a sua utilização para os mesmos tipos de aplicação.

À partir da abertura de informações à respeito do GLONASS foi possível a realização de pesquisas, com a finalidade de associá-lo ao GPS. Desta forma a comunidade usuária passou a considerar os sistemas como complementares. Ambos os sistemas passaram por dificuldades durante seus períodos de implantação, sendo que apenas em março de 1994 o GPS atingiu o estágio de sistema completamente operacional (KRUEGER, 1996, p.5), quando 24 satélites passaram a operar sem problemas (conforme os critérios originais estabelecidos para o sistema). O cronograma de implantação do GLONASS foi prejudicado pela dissolução da União Soviética, devido à diminuição de recursos destinados ao seu

desenvolvimento e manutenção, não estando ainda hoje num estado plenamente operacional (SANTOS, 1998, p.45).

A disponibilidade de satélites proporcionada pelo uso combinado do GPS e do GLONASS, oferece diversas vantagens para o posicionamento. Diante desta característica, a associação dos sistemas vem despertando crescente interesse entre a comunidade científica internacional.

Diversas implicações estão envolvidas na integração de dados GPS/GLONASS envolvendo sistemas de referência, características de transmissão dos sinais, programas de processamento de dados, entre outras. Pode-se observar na literatura internacional, diversos trabalhos relacionados à integração GPS/GLONASS. Dentre os autores existentes pode-se citar aqueles que destacam aspectos genéricos dos sistemas, abordados por (LANGLEY, 1997), (ZARROA et. al., 1998), (MISRA et. al., 1996), (FEAIRHELLER, 1994), (BESER and HAUNSCHILD, 1995), (WALSH and DALY, 1998). Os trabalhos relativos à transformação entre os sistemas WGS-84 e o PZ-90, são abordados principalmente por (MISRA and ABBOT, 1994), (ROSSBACH, HABRICH and ZARROA, 1996), (MISRA, ABBOT and GASPOCHIN, 1996). Existem ainda autores que abordam os aspectos matemáticos envolvidos na integração GPS/GLONASS, dos quais pode-se citar (LEICK, 1993), (LEICK, 1995), (WANG, 1999), (MONICO, 2000) (RABY and DALY, 1993), (HABRICH, 1999).

1.2 CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

A principal contribuição desta dissertação é destacar os aspectos envolvidos na compatibilização dos sistemas de posicionamento global GPS e GLONASS, no que se refere à sua aplicação aos levantamentos geodésicos. Dentro deste contexto apresenta-se uma revisão bibliográfica destacando as principais características dos sistemas. São apresentados também resultados obtidos à partir de estudos experimentais, nos quais foram efetuadas comparações de desempenho dos sistemas GPS e GLONASS. Visando facilitar o entendimento do tema a exposição do trabalho é feita de forma comparativa para os dois sistemas envolvidos.

Este trabalho pode ser considerado também como uma contribuição à literatura existente sobre o tema, principalmente no que se refere a trabalhos

publicados em língua portuguesa, uma vez que a principal concentração de artigos publicados está na literatura internacional. Outra contribuição apresentada visa destacar a aplicabilidade prática do sistema GLONASS, principalmente considerando as dificuldades provocadas pelo fato da sua constelação estar incompleta. Neste contexto procurou-se comprovar algumas das vantagens oferecidas pela utilização conjunta dos sistemas GPS e GLONASS, apresentando-se resultados obtidos com GPS, GLONASS e GPS/GLONASS.

1.3 JUSTIFICATIVA

A associação GPS e GLONASS possibilita acesso potencial a uma constelação de 48 satélites. Na prática tem-se disponíveis atualmente 37 satélites, dos quais 29 pertencem ao sistema GPS e 8 ao GLONASS. Esta disponibilidade proporciona diversas vantagens no posicionamento, tais como melhor precisão em áreas com visibilidade restrita, melhoria da qualidade do posicionamento isolado, maiores possibilidades de obter boa geometria no rastreo e verificação dos resultados obtidos com o uso de cada sistema separadamente. O GPS é o sistema mais difundido entre os usuários e vem sendo utilizado extensivamente em várias aplicações. Em contrapartida, o GLONASS vem ganhando espaço gradativamente, principalmente como um sistema complementar ao GPS. Devido a estas circunstâncias a motivação para realizar este trabalho é o estudo dos procedimentos necessários à compatibilização dos sistemas GPS e GLONASS, visando comprovar as facilidades advindas do seu emprego conjunto, quando aplicados aos levantamentos geodésicos.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em seis capítulos, subdivididos em seções quando necessário. O tema foi abordado seguindo esta estrutura, considerada conveniente para organizar o assunto.

O capítulo 2 apresenta as principais características dos sistemas GPS e GLONASS, mostrando de forma comparativa os segmentos espacial e de controle, a

estrutura dos sinais, os formatos e conteúdos das mensagens de navegação, os sistemas de tempo, os sistemas de referência utilizados e seu relacionamento.

O capítulo 3 aborda os modelos matemáticos empregados no posicionamento com os sistemas GPS e GLONASS, enfocando seu princípio básico de medição, observáveis utilizadas, combinações lineares de observações, resolução das ambigüidades, configuração geométrica dos satélites. Neste capítulo aborda-se também os métodos de posicionamento absoluto e relativo, com o emprego de levantamento estático.

No capítulo 4 descreve-se os levantamentos realizados, apresentando-se as características do equipamento utilizado e a área em que foram realizados os testes. Apresenta-se também o programa *Pinnacle*, utilizado no processamento das observações, mostrando as principais etapas necessárias para a execução de um processamento.

No capítulo 5 apresenta-se os resultados obtidos nos levantamentos, à partir da análise de gráficos gerados com dados GPS e GLONASS, tanto no posicionamento absoluto quanto no relativo.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

2 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL

2.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE POSICIONAMENTO GLOBAL GPS E GLONASS

A descrição dos sistemas de posicionamento global GPS (*Global Positioning System*) e GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) normalmente é feita em termos dos seus segmentos, a saber, o segmento espacial, o segmento de controle e o segmento usuário. O segmento espacial é constituído pela constelação de satélites de cada um dos sistemas. O segmento de controle é composto pelas estações monitoras que rastreiam os satélites, determinam suas órbitas e definem as informações a serem transmitidas pelos satélites. O segmento usuário é composto pelos diversos usuários dos sistemas, civis e militares, acessível por meio de receptores capazes de receber os sinais emitidos pelos satélites GPS e GLONASS.

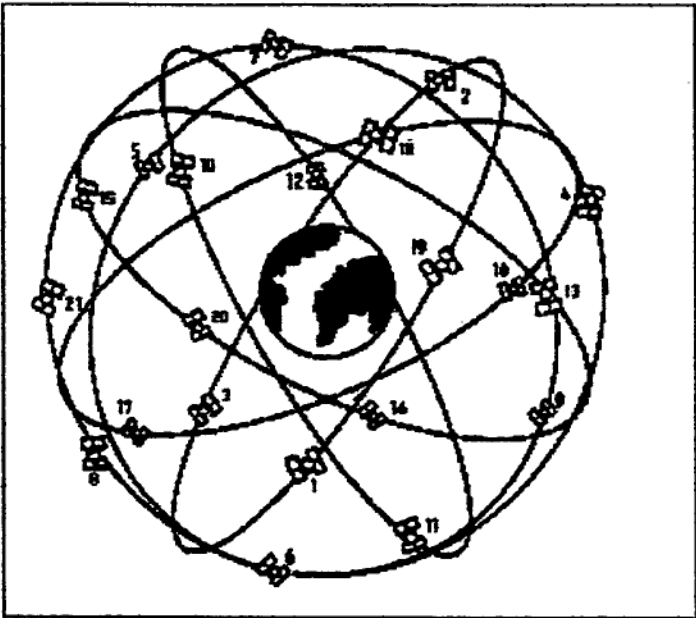
A constelação definitiva do GPS é composta por 24 satélites, sendo 21 operacionais e 3 reservas ativos (atualmente existem 29 satélites ativos no sistema GPS), distribuídos em seis planos orbitais. Cada plano orbital contém 4 satélites em órbita quase circular, a uma altura de aproximadamente 20.000 km e inclinação de 55 graus em relação ao equador. O período orbital destes satélites é de 12 horas siderais. Na figura 2.1 mostra-se a configuração espacial do sistema GPS.

A constelação do GLONASS, quando totalmente implantada, terá 24 satélites dispostos em três planos orbitais. Cada plano orbital terá 8 satélites em órbita quase circular, com altura de aproximadamente 19.000 km, inclinação de 64,8 graus em relação ao equador e período orbital de 11,3 horas siderais. Na figura 2.2 mostra-se a configuração espacial do GLONASS.

As diferenças nas características espaciais do GPS e do GLONASS, no que se refere à quantidade de planos orbitais (6 para o GPS e 3 para o GLONASS) e inclinação das órbitas, proporciona diferenças na disponibilidade de satélites em função da latitude. Desta forma o GLONASS oferece melhor cobertura nas latitudes extremas enquanto que o GPS favorece as latitudes médias. Tais características tornam-se mais pronunciadas à medida que o ângulo da máscara de observação aumenta. Assim quando se trabalha com um receptor que combina dados

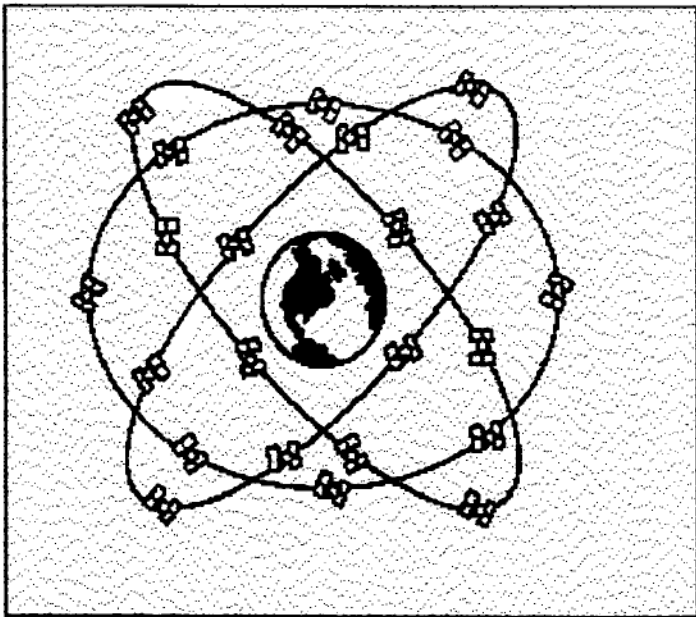
GPS/GLONASS pode-se aproveitar as potencialidades de cada sistema, pois um sistema supera as limitações do outro. (BESER & HAUNSCHILD, 1995).

FIGURA 2.1 – CONFIGURAÇÃO DOS SATÉLITES GPS



(FONTE: SEEBER, 1993)

FIGURA 2.2 – CONFIGURAÇÃO DOS SATÉLITES GLONASS



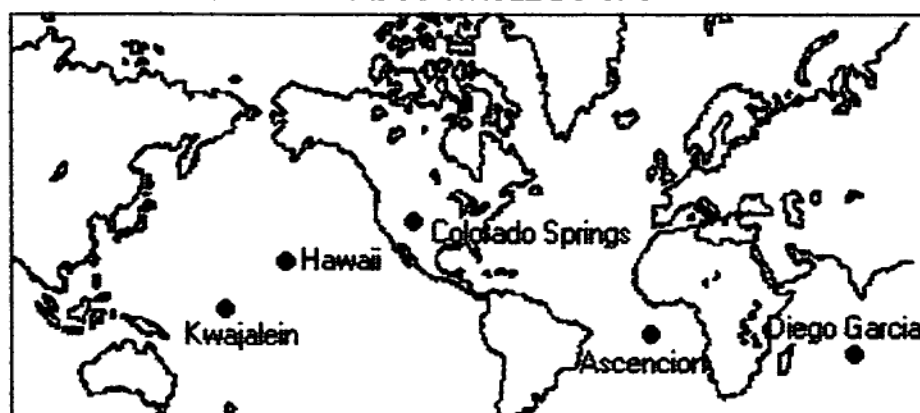
(FONTE: SEEBER, 1993)

O segmento de controle, responsável pela operação dos sistemas, tem a finalidade de monitorar o comportamento dos osciladores atômicos e a saúde dos satélites, determinar suas órbitas e transmitir aos satélites a mensagem que eles retransmitirão posteriormente. Este segmento é composto por estações terrestres, bem distribuídas geograficamente, nas quais realiza-se o rastreo de todos os satélites disponíveis.

A mensagem de navegação é determinada à partir do processamento conjunto dos dados coletados nas estações de rastreo. Esta mensagem é atualizada periodicamente, com o objetivo de manter um padrão de qualidade em termos de precisão, na determinação da posição dos satélites. Deste modo a precisão das coordenadas dos satélites está relacionada à idade da mensagem de navegação.

No GPS o sistema de controle continha inicialmente cinco estações terrestres pertencentes à Força Aérea, localizadas em Colorado Springs (Estação de Controle Mestra), Hawaii, Ascencion Islands, Diego Garcia e Kwajalein. Com o desenvolvimento e aprimoramento do sistema foram adicionadas sete estações ao segmento de controle, pertencentes ao NIMA (National Imagery Mapping Agency). Estas estações estão localizadas no Equador, Argentina, Inglaterra, Bahrain, Austrália, China e USNO (CUNNINGHAM, SWIFT, MUELLER, 1999). As cinco estações originais do segmento de controle do GPS são mostradas na Figura 2.3.

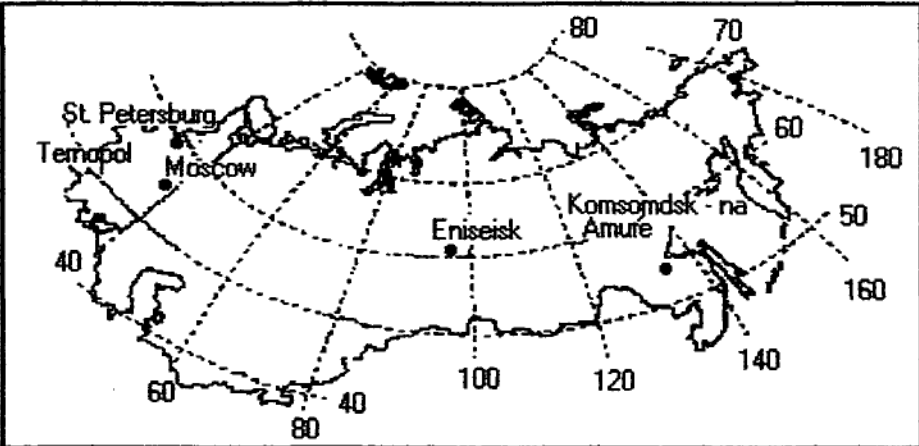
FIGURA 2.3 – SEGMENTO DE CONTROLE DO GPS



(FONTE: HOFMANN-WELLENHOF et. al., 1994)

O segmento de controle do GLONASS é composto por cinco estações terrestres, distribuídas em território pertencente à antiga União Soviética, localizadas em Moscou (Estação de Controle Mestra), St. Peterburg, Ternopol, Eniseisk, Komsomdsk-na-Amure. Tais estações são mostradas na Figura 2.4.

FIGURA 2.4 – SEGMENTO DE CONTROLE DO GLONASS



(FONTE: SEEBER, 2000)

As concepções básicas dos sistemas, no que se refere às características orbitais, sinais utilizados e sistemas de referência são mostradas resumidamente na tabela 2.1.

TABELA 2.1 – COMPARAÇÃO ENTRE GPS E GLONASS

	GLONASS	GPS
Número de satélites	24	24
Número de planos orbitais	3	6
Inclinação dos planos orbitais	64,8	55
Semi-eixo maior da órbita	25510 km	26560 km
Frequência fundamental (f_0)	5,11 MHz	10,23 MHz
Técnica de separação do sinal	FDMA	CDMA
Frequência das portadoras (MHz)		
L1	de 1602,0 a 1615,5	1575,42
L2	de 1246,0 a 1256,5	1227,60
Frequência dos códigos (MHz)		
C/A	0,511	1,023
P	5,110	10,23
Efemérides transmitidas Pelos satélites	Coordenadas Cartesianas Geocêntricas e suas derivadas	Elementos Orbitais Keplerianos e seus fatores de perturbação
Tempo de referência	UTC (SU)	UTC (USNO)
Sistema de referência	PZ-90	WGS-84

(FONTE: ADAPTADO DE LANGLEY, 1997)

2.2 ESTRUTURA DOS SINAIS

Os satélites dos sistemas de posicionamento global geram seus sinais à partir da frequência fundamental f_0 , modulados em duas portadoras na banda L, denotadas por L1 e L2. No caso do GPS utiliza-se uma frequência para cada portadora, enquanto que para o GLONASS empregam-se dois intervalos de frequência distintos, um para cada portadora. O emprego de mais de uma frequência possibilita a eliminação do atraso provocado pela propagação dos sinais na ionosfera.

A portadora L1 é modulada pelos códigos P (precise) e C/A (clear acquisition) enquanto que a portadora L2 é modulada apenas pelo código P. Além de conter os códigos ambas as portadoras contém o fluxo de dados, composto pelas efemérides, pelos parâmetros dos relógios e *status* do sistema.

O código P é destinado a usuários militares, com acesso restrito a usuários não autorizados enquanto que o C/A destina-se a usuários civis.

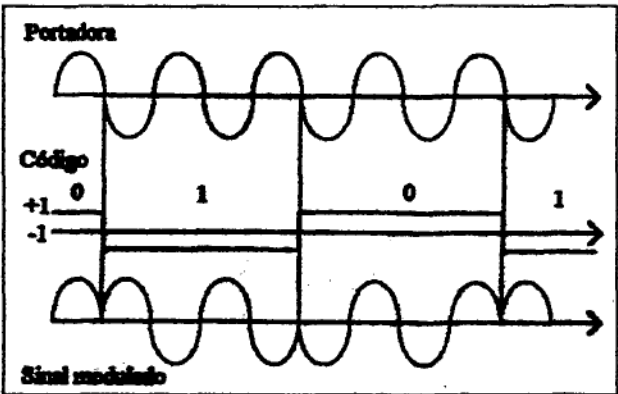
A geração dos padrões de frequência é controlada pelos osciladores atômicos à bordo dos satélites, que permitem a definição da frequência das portadoras, dos códigos e da mensagem. Os satélites GPS utilizam osciladores de césio e rubídio enquanto que os GLONASS empregam osciladores de césio.

Os códigos são constituídos por uma sequência com os estados +1 ou -1, correspondentes aos valores binários 0 ou 1. Ambos os sistemas utilizam a modulação bifásica (figura 2.5), na qual realiza-se uma alteração de 180 graus na fase da portadora sempre que ocorre uma mudança no estado do código (WELLS et. al., 1986).

No GPS o código C/A é gerado por um algoritmo que se repete a cada milissegundo. Este código possui frequência de 1,023 MHz e comprimento de onda de 300 metros. O código P é gerado por um algoritmo que se repete a cada 267 dias, com frequência de 10,23 MHz e comprimento de onda de 30 metros. Todos os satélites geram o mesmo código P porém cada um transmite um segmento correspondente a uma semana. Esta técnica é conhecida como CDMA (*Code Division Multiple Access*). Ao final da semana GPS, às 0 horas UT (*Universal Time*) da noite de sábado para domingo, cada satélite volta a transmitir o segmento da semana que lhe foi atribuído. O fluxo de dados que compõe a mensagem de

navegação transmitida pelos satélites possui frequência de 50 bps que se repete a cada 30 segundos.

FIGURA 2.5 – MODULAÇÃO BIFÁSICA



(FONTE: SANTOS, 1990)

Os sinais do sistema GPS possuem frequência fundamental de 10,23 MHz o que conduz a uma frequência de 1575,42 MHz para a portadora L1 e 1227,60 para a portadora L2.

A frequência fundamental do GLONASS é de 5,11 MHz. Os valores nominais das frequências das portadoras L1 e L2 são definidos pelas expressões a seguir:

$$f_{K1} = f_1 + K\Delta f_1 \tag{2.1}$$

$$f_{K2} = f_2 + K\Delta f_2 \tag{2.2}$$

onde:

K é o número do canal de frequência dos sinais transmitidos

$$f_1 = 1602\text{MHz}$$

$$f_2 = 1246\text{MHz}$$

$$\Delta f_1 = 0,5625\text{MHz}$$

$$\Delta f_2 = 0,4375\text{MHz}$$

Originalmente foi estabelecido um intervalo para transmissão dos sinais GLONASS, contendo 25 canais de frequência, o que proporciona um canal para cada satélite. Esta configuração original foi modificada, devido a interferências em rádio-astronomia (que atua na banda 1610,6 a 1613,8 MHz), obtendo-se um novo intervalo, com 12 canais disponíveis. Para tornar possível a transmissão dos sinais

de 24 satélites, empregando apenas 12 canais de frequência, foi estabelecido que satélites localizados no mesmo plano orbital, em posições antípodas, dividiriam um único canal. A mudança para as novas frequências iniciou em setembro de 1993, conforme verifica-se na Tabela 2.2.

TABELA 2.2 – INTERVALOS DE FREQUÊNCIA UTILIZADOS PELO GLONASS

$f_{K1}=(1,602 + K \times 0,5625)$ MHz $f_{K2}=(1,246 + K \times 0,4375)$ MHz onde K é o número do canal, fornecido na mensagem de navegação dos satélites.
Originalmente: K = 0, 1, 2, 24
Previsto para o período de 1998 a 2005: K= -7,....., 12
Previsto para após 2005: K= -7,....., 4

(FONTE: ADAPTADO DE LANGLEY, 1997)

No GLONASS o sistema de transmissão utilizado é o FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Isto permite que cada satélite transmita seus sinais em uma frequência própria. O código C/A possui frequência de 0,511 MHz, enquanto que o código P possui frequência de 5,11 MHz, enquanto que a mensagem de navegação dos satélite é transmitida com frequência de 50 bps e têm duração de 2 segundos.

2.3 TÉCNICAS DE SEGURANÇA

As observações GPS são afetadas por técnicas de segurança que provocam erros na determinação de coordenadas. Estas técnicas são denominadas de SA (*Selective Availability*) e AS (*Anti-Spoofing*). A disponibilidade seletiva (SA), desligada no dia 2 de maio de 2000, é aplicada através da manipulação dos dados das efemérides. Se manifesta como um erro artificial e proposital, visando degradar a precisão no posicionamento absoluto. A maior parte deste efeito é eliminado no posicionamento relativo. A aplicação do *Anti-Spoofing* (AS) consiste na substituição do código P por um código preciso Y. O acesso a este código é permitido apenas aos usuários autorizados. Atualmente é possível para alguns receptores geodésicos a recuperação da portadora L2, mediante a utilização de técnicas especiais. Dentro deste contexto pode-se destacar os Serviços de Posicionamento Padrão (SPS) e Serviço de Posicionamento Preciso (PPS). O SPS é acessível a todos os usuários

do sistema, sem nenhuma restrição. Está sujeito aos erros causados pela Disponibilidade Seletiva e pelo *Anti-Spoofing* , com a finalidade de limitar a precisão do sistema aos usuários não autorizados. As características básicas deste serviço são mostradas na tabela 2.3.

TABELA 2.3 – CARACTERÍSTICAS DO SERVIÇO DE POSICIONAMENTO PADRÃO DO GPS

Código Usado	C/A
Portadora Usada	L1
Usuários Potenciais	Civis
Precisão Horizontal	100 metros (2σ) ¹
Precisão Vertical	156 metros (2σ)
Tempo	167 ns (1σ) ²

(FONTE: SANTOS, 1990)

O PPS é destinado aos usuários autorizados pelo Departamento de Defesa Americano (DoD) e fornece a modalidade de posicionamento e precisão associada, para o qual o GPS foi concebido. Tal serviço não é afetado por erros artificiais, ou seja, não está sujeito às degradações causadas pela Disponibilidade Seletiva e pelo *Anti-Spoofing*. Suas características são dadas na tabela 2.4.

TABELA 2.4 – CARACTERÍSTICAS DO SERVIÇO DE POSICIONAMENTO PRECISO DO GPS

Código Usado	P
Portadora Usada	L1 e L2
Usuários Potenciais	Militares
Precisão Horizontal	17,8 metros (2σ)
Precisão Vertical	27,7 metros (2σ)
Tempo	100 ns (1σ)

(FONTE: SANTOS, 1990)

Recentemente a política de segurança do DoD foi modificada, desativando-se a Disponibilidade Seletiva. Desta forma, atualmente é possível obter precisões em torno de 30 metros tanto no posicionamento horizontal quanto no vertical. No

¹ O critério 2σ significa que existe uma probabilidade de que 95% dos erros estejam dentro do valor especificado.

² O critério 1σ significa que existe uma probabilidade de que 66% dos erros estejam dentro do valor especificado.

entanto deve-se ressaltar que o SPS continua sujeito aos efeitos causados pelo *Anti-Spoofing*.

No caso do GLONASS não existe uma política para implementação de técnicas de segurança, com o objetivo de degradar a acurácia dos sinais. Existe porém uma distinção entre os sinais de navegação, que são divididos em dois tipos: sinal de acurácia padrão e sinal de alta acurácia. O sinal de acurácia padrão possui frequência de 0,511 MHz, sendo designado aos usuários civis. O sinal de alta acurácia, com frequência de 5,11 MHz é modulado por um código especial e seu uso indiscriminado não é recomendado sem a autorização do Ministro de Defesa russo (CSIC, 1998). Desta forma a acurácia obtida com a utilização do código C/A é de 60 metros (3σ) no posicionamento horizontal e de 75 metros (3σ) no posicionamento vertical.

2.4 FORMATO E CONTEÚDO DAS MENSAGENS

As mensagens dos sistemas de posicionamento global são formadas por um conjunto de informações imprescindíveis à sua utilização. Estas mensagens são subdivididas em quadros, compostos pelas seguintes informações:

- Efemérides transmitidas: contém posição dos satélites e a sua variação temporal;
- Saúde dos satélites: informam as condições das efemérides transmitidas e das componentes dos sinais;
- Idade dos dados: indica o intervalo de tempo decorrido desde a última atualização dos dados transmitidos pelos satélites;
- Coeficientes para a correção do relógio: contém parâmetros para a modelagem da deriva do oscilador do satélite;
- Almanques dos satélites: contém as efemérides dos mesmos, permitindo a obtenção menos precisa da posição para efeito de planejamento do rastreamento.
- Modelos para a correção do atraso ionosférico: necessário aos receptores de apenas uma frequência.

2.4.1 Mensagem de Navegação do GPS

A mensagem de navegação do GPS é formada por quadros, subquadros e palavras. Cada quadro é composto por 5 subquadros de 300 bits, sendo que cada conjunto de 30 bits forma uma palavra.

O início de cada subquadro é composto pelas palavras de telemetria TLM (*Telemetry Word*) e pela palavra HOW. A TLM contém um preâmbulo de 8 bits, utilizado como padrão de sincronização, para facilitar o acesso aos dados de navegação. A palavra HOW contém o contador Z, que permite ao receptor a sintonização do código P, mediante o conhecimento de qual faixa do código está sendo varrida dentro da extensão de 7 dias (SANTOS, 1990).

As efemérides do GPS contém elementos keplerianos, que definem o movimento dos satélites, quando sujeitos apenas à parte relativa ao problema dos dois corpos da atração gravitacional e suas variações temporais, resultantes da ação das forças perturbadoras que agem sobre os satélites provocando variações na sua órbita. Estas forças são provocadas pelo geopotencial, atração luni-solar, e pressão de radiação solar.

Todas as informações relativas aos satélites são transmitidas através dos subquadros. Cada subquadro contém informações distintas, descritas a seguir:

Subquadro 1:

- número da semana GPS;
- número do satélite;
- idade dos dados;
- saúde do satélite;
- coeficientes para correção do relógio do satélite.

Subquadros 2 e 3:

- parâmetros orbitais (efemérides transmitidas).

Subquadro 4:

- modelo para a refração ionosférica;
- diferença entre os tempos GPS e UTC;
- almanaque para os satélites 25 a 32, caso existam mais do que 24 satélites em órbita;
- estado de funcionamento (saúde) dos satélites 25 a 32.

Subquadro 5:

- almanaque para os primeiros 24 satélites em órbita;
- estado de funcionamento (saúde) destes satélites.

As informações contidas nos subquadros de 1 a 3 são repetidas em cada quadro, até que sejam renovadas. Os subquadros 4 e 5 contêm dados distintos, transmitidos através de 25 seqüências consecutivas, após o que são repetidos. Cada quadro tem duração de 30 segundos, sendo necessário um período de 12,5 minutos para obter o conteúdo completo dos subquadros 4 e 5.

2.4.2 Mensagem de Navegação do GLONASS

A mensagem de navegação do GLONASS é composta por informações imediatas e não imediatas. Os dados imediatos contêm as seguintes informações:

- enumeração do sinal de tempo do satélite;
- diferença entre as escalas de tempo, à bordo do satélite e do sistema de controle do GLONASS;
- diferença relativa entre a frequência da portadora transmitida pelo satélite e o seu valor nominal;

- parâmetros das efemérides;

As informações não imediatas contêm o almanaque do sistema, incluindo:

- dados sobre o *status* de todos os satélites do segmento espacial;
- correções grosseiras para a escala de tempo dos satélites, relativas ao tempo GLONASS;
- parâmetros orbitais de todos os satélites do segmento espacial;
- correções para o tempo GLONASS em relação ao tempo UTC(SU).

A mensagem do GLONASS é transmitida através da contínua repetição de superquadros. Um superquadro consiste de quadros, sendo que um quadro consiste de seqüências.

Cada superquadro tem duração de 2,5 minutos e contém 5 quadros com duração de 30 segundos. Um quadro é composto por 15 seqüências com duração de 2 segundos.

Após a transmissão de cada quadro obtém-se o conteúdo total dos dados não imediatos.

Os quadros de 1 a 4 são idênticos e contém *bits* reservados para serem utilizados em uma futura modernização na estrutura da mensagem de navegação.

Os dados transmitidos nas seqüências de 1 a 4, de cada quadro, contém informações imediatas, que são as mesmas dentro de um superquadro. As seqüências de 6 a 15, de cada quadro, contém dados não imediatos para os 24 satélites do segmento espacial.

2.5 SISTEMAS DE TEMPO

Os sistemas de tempo do GPS e do GLONASS são realizados por osciladores atômicos à bordo de seus satélites e por aqueles das estações do Segmento de Controle.

O tempo mantido pelos osciladores à bordo dos satélites difere daquele mantido pelos osciladores do segmento de controle (estações terrestres), devido a flutuações na frequência do oscilador do satélite. Desta forma o segmento de controle observa e prediz o comportamento do relógio, fazendo uma modelagem do seu comportamento.

O tempo GPS teve início às 0^h UTC do dia 6 de janeiro de 1980 e possui uma diferença constante com o TAI (Tempo Atômico Internacional) de 19^s. É baseado no Tempo Universal Coordenado (UTC) fornecido pelo *U. S. Naval Observatory* [(UTC (USNO))], porém sem a introdução das correções de segundos inteiros (*leap seconds*), periodicamente aplicada atinge ao UTC. Assim passou a existir uma diferença constante entre o tempo GPS e o UTC, sendo necessário o seu conhecimento para obter a hora através dos satélites GPS.

O tempo GLONASS é gerado com base no Sincronizador Central do Tempo GLONASS (CS), mantido por relógios de maser de hidrogênio, cuja instabilidade é inferior a 5.10^{-14} . É baseado no Tempo Universal Coordenado realizado pela Rússia [(UTC (SU))], e inclui as correções *leap seconds*. (CSIC, 1998, apud SANTOS et. al., 1999).

O termo “tempo atômico” advém do fato destes sistemas de tempo serem mantidos por relógios atômicos. O Tempo Atômico que define a escala de tempo, fundamental e contínua, que serve de base para os Serviços da Hora, é o Tempo Atômico Internacional (TAI). O intervalo unitário do TAI é exatamente um segundo do

Sistema Internacional (SI) ao nível do mar. Devido ao fato desta escala de tempo ser uniforme, o TAI tornou-se dessincronizado com o Dia Solar. Este problema foi resolvido com a introdução do Tempo Universal Coordenado (conhecido pela sigla UTC, de "*Universal Coordinated Time*"). A diferença entre o TAI e o UTC é, por definição, igual a um número inteiro de segundos. Esta diferença é alterada, pela inserção de um segundo inteiro (muitas vezes chamado de "*leap second*") no UTC, sempre que a diferença entre UT1 e UTC for projetada para tornar-se maior que 0,9^s, em valor absoluto. A decisão de introduzir um segundo no UTC, visando atingir esta condição, é da responsabilidade do Serviço Internacional da Rotação da Terra (conhecido pela sigla IERS, oriunda de "*International Earth Rotation Service*"). O IERS, por sua vez, trabalha em colaboração com o *Bureau International de Poids et Measures* (BIPM)." (SANTOS, 1999, p. 8).

Devido à aplicação das correções *leap second* não existe uma diferença de segundos inteiros entre o tempo GLONASS e o UTC(SU). Contudo existe uma diferença constante entre estas escalas de tempo, a qual é dada pela expressão (2.3).

$$t_{\text{GLONASS}} = \text{UTC(SU)} + 3\text{h}00\text{ min} \quad (2.3)$$

Os tempos GPS e GLONASS possuem uma diferença, igual a um número inteiro de segundos, provocada pelas correções *leap seconds*. Além desta diferença, os tempos GLONASS e GPS podem divergir de alguns microsegundos. As autoridades russas expressaram a intenção de manter esta diferença abaixo do microsegundo. (ZARROA et. al., apud SANTOS et. al., 1999).

2.6 SISTEMAS DE REFERÊNCIA

Os dados obtidos com o rastreamento dos satélites GPS fornecem posições relacionadas ao sistema de referência WGS-84 (*World Geodetic System*). A sua definição, semelhante à dos ITRFs (ICD-GPS-200, 1991) é descrita a seguir:

- a) Origem: no centro de massa da Terra;
- b) Eixo X: interseção do plano meridiano de referência do WGS-84 com o plano do equador astronômico médio. O meridiano de referência é paralelo ao meridiano zero definido pelo BIH (*Bureau International de l'Heure*);

c) Eixo Z: paralelo à direção do CIO (*Conventional International Origem*), conforme definido pelo BIH;

d) Eixo Y: completa o sistema destrógiro.

Durante os últimos anos o WGS-84 passou por vários refinamentos, atendendo às exigências das comunidades científicas e usuária por um sistema mais consistente e preciso (SLATER et. al., 1997).

A primeira materialização do WGS-84 foi realizada em 1987, baseada em um conjunto de coordenadas de 10 estações distribuídas globalmente. Esta materialização passou pelo seu primeiro refinamento em 1994, sendo empregados para isto dados de 24 estações. Esta realização do sistema foi denominada de WGS-84 (G730), e entrou em vigor em 29/06/1994. A segunda realização deste sistema foi necessária devido à adição de duas novas estações à rede anterior e também devido ao reposicionamento de duas estações. Esta última materialização foi denominada de WGS-84 (G873) e corresponde à realização atual do sistema de referência WGS-84, a qual entrou em vigor à partir de 29/01/1997.

As efemérides fornecidas pelo GLONASS são referidas ao sistema de referência PZ-90 (*Parametry Zemli* 1990). Este sistema substituiu o SGS-85 (Sistema Geodésico Soviético 1985), usado pelo GLONASS até 1993. A definição do SGS-85 é descrita a seguir (ICD-GLONASS,1997):

- a) Origem: no centro de massa da Terra;
- b) Eixo X: está no plano do equador médio para a época 1900-1905;
- c) Eixo Z: está no pólo norte médio para a época 1900-1905;
- d) Eixo Y: completa o sistema destrógiro.

As constantes definidoras do WGS-84 e do PZ-90 são apresentadas na tabela 2.5, na qual pode-se observar que existem grandes semelhanças entre os dois referenciais.

TABELA 2.5 – CONSTANTES DEFINIDORAS DO WGS-84 E DO PZ-90

Parâmetro	Símbolo	WGS-84	PZ-90
Velocidade de rotação da Terra	ω	$7,292115 \times 10^{-5}$ rad/s	$7,292115 \times 10^{-5}$ rad/s
Cte gravitacional geocêntrica	GM	$398600,50 \text{ km}^3/\text{s}^2$	$398600,44 \text{ km}^3/\text{s}^2$
Harmônico zonal do 2º grau	J2	$-1082,6300 \times 10^{-6}$	$-1082,6257 \times 10^{-6}$
Semi-eixo maior	A	6.378.137 m	6.378.136 m
Achatamento	α	1/298,257223563	1/298,257284000
Gravidade normal no equador	γ_e	978033,0 mGal	978032,8 mGal

(FONTE: LANGLEY, 1997)

2.7 PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE O WGS-84 E O PZ-90

Apesar dos sistemas apresentarem definições semelhantes, existem pequenas diferenças entre o PZ-90 e o WGS-84, representadas por rotações, translações e escala. A associação dos sistemas GPS e GLONASS em Geodésia e Navegação requer o conhecimento de parâmetros de transformação que estabeleçam o relacionamento entre os dois referenciais. O conhecimento destes parâmetros é de fundamental importância para a combinação dos dois sistemas. A transformação entre os dois referenciais ainda não é conhecida globalmente, de forma satisfatória. Existem algumas soluções relatadas na literatura. Em uma delas foram utilizadas seis estações de rastreo na Europa, com coordenadas previamente conhecidas no referencial ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*). Esta solução indicou a existência de um único parâmetro com valor significativo, representado por uma rotação em torno do eixo Z, estimada em $-0,33''$ ou $1,6 \cdot 10^{-6}$ rad. Esta transformação é dada por (ROSSBACH et al., 1996):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} = \begin{bmatrix} 1 & -1,6 \cdot 10^{-6} \text{ rad} & 0 \\ 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ rad} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{PZ-90}} \quad (2.4)$$

Outra solução, apresentada por Misra et. al. 1996, é baseada na comparação da posição orbital de dois satélites GLONASS, expressas em PZ-90 e em WGS-84. As posições dadas em WGS-84 foram obtidas através de ajustamento, tendo como informação inicial observações de rastreo a laser, feitas por estações distribuídas globalmente. Os resultados obtidos indicam a existência de uma rotação de $-0,4''$ ou $1,9 \cdot 10^{-6}$ rad em torno do eixo Z e uma translação de 2,5 m ao longo do eixo Y. Esta transformação é dada por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2,5 \text{ m} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1,9 \cdot 10^{-6} \text{ rad} & 0 \\ 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ rad} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{PZ-90}} \quad (2.5)$$

A terceira solução apresentada na literatura (BASLOV et al., 1999) utilizou 8 estações de rastreo, todas localizadas em território russo. Esta solução indicou

valores de translação ao longo dos três eixos, rotação em torno do eixo Z de $-0,47''^3$ ou $2,3 \cdot 10^{-6}$ rad e um fator de escala de $0,12 \times 10^{-6}$ metros, sendo dada por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF} = \begin{bmatrix} -1,1\text{m} \\ -0,3\text{m} \\ -0,9\text{m} \end{bmatrix} + (1 - 0,12 \times 10^{-6}) \begin{bmatrix} 1 & -2,3 \cdot 10^{-6} \text{ rad} & 0 \\ -2,3 \cdot 10^{-6} \text{ rad} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{PZ-90} \quad (2.6)$$

Existem ainda soluções globais resultantes do Experimento Internacional GLONASS, conhecido como IGEX (*International GLONASS Experiment*). As soluções obtidas neste experimento baseiam-se na comparação entre as órbitas transmitidas pelos satélites GLONASS, em PZ-90, e suas respectivas órbitas precisas, estimadas em ITRF-96. Os resultados obtidos sugerem a existência de translações e rotações ao longo dos três eixos, além do fator de escala. Para se ter uma idéia da ordem de grandeza destes parâmetros, mostra-se uma solução média obtida para a semana 1004, calculada a partir das soluções diárias apresentadas por Habrich (2000), dada por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF} = \begin{bmatrix} +0,005\text{m} \\ +0,021\text{m} \\ -0,129\text{m} \end{bmatrix} + (1 - 0,012 \times 10^{-6}) \begin{bmatrix} 1 & -1,7 \cdot 10^{-6} \text{ rad} & 4,8 \cdot 10^{-9} \text{ rad} \\ 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ rad} & 1 & 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ rad} \\ -4,8 \cdot 10^{-9} \text{ rad} & -1,9 \cdot 10^{-7} \text{ rad} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{PZ-90} \quad (2.7)$$

Nas quatro transformações entre os sistemas, apresentadas anteriormente, pode-se verificar uma coerência em termos da rotação em torno do eixo Z. As rotações encontradas na transformação obtida da campanha IGEX podem não ser estatisticamente significativas, dada a discrepância encontrada em relação às demais soluções. As soluções apresentadas sugerem também a existência de uma pequena variação em termos de escala e posição geocêntrica. Deve-se ressaltar que o relacionamento entre o WGS-84, PZ-90 e o ITRF ainda é motivo de investigação pois os parâmetros devem ser refinados.

³ Nas quatro transformações apresentadas utilizou-se uma aproximação para as matrizes de rotação, substituindo-se os senos dos ângulos pelo próprio valor do ângulo e os cossenos dos ângulos por 1. Esta aproximação é utilizada quando tem-se ângulos de pequeno valor numérico, onde o valor do seno do ângulo se aproxima do seu próprio valor numérico e o cosseno do ângulo se aproxima de 1.

2.8 CAMPANHA IGEX

A primeira campanha IGEX foi conduzida no período de 19 de outubro de 1998 a 19 de abril de 1999. Foi o primeiro experimento internacional dedicado ao rastreamento e análise do sistema GLONASS. A campanha foi patrocinada pela Associação Internacional de Geodésia, IGS (*International GPS Service for Geodynamics*), ION (*Institute of Navigation*) e IERS (*International Earth Rotation Service*). O experimento foi realizado por um comitê dirigente, composto por membros destas instituições, que estabeleceram as normas para monumentação das estações, documentação dos receptores, protocolos do rastreamento dos satélites, formato, transmissão e armazenagem dos dados.

Com a realização da campanha foram produzidas efemérides pós-processadas precisas, com nível submétrico, para todos os satélites operacionais GLONASS. Os resultados gerados durante a campanha facilitaram algumas aplicações do sistema incluindo transferência de tempo, parâmetros de transformação entre o PZ-90 e WGS-84. As principais realizações alcançadas com a execução da campanha foram as seguintes:

- a) Estabelecimento de uma rede global, composta por 60 estações de rastreamento e 30 observatórios para rastreamento *laser*, localizados em 25 países;
- b) Coleta contínua de dados durante o período de 6 meses, compreendido entre 19 de outubro de 1998 e 19 de abril de 1999. Os dados foram armazenados no GSFC (*NASA's Goddard Space Flight Center*) nos Estados Unidos e no IGN (*Institut Géographique National*);
- c) Cálculo de órbitas precisas, obtidas por 11 centros de análise, utilizando dados SLR (*Satellite Laser Ranging*) e GLONASS, resultando em uma acurácia entre 20 e 50 centímetros;
- d) Diversos programas de processamento, concebidos para observações GPS (Bernese, GIPSY), foram modificados de forma a poderem processar observações GLONASS;
- e) Os formatos RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) e SP3 foram expandidos de modo a incluir dados GLONASS;
- f) Diversos grupos obtiveram parâmetros de transformação, relacionando os sistemas de referência PZ-90 e o WGS-84.

Na rede estabelecida para o experimento IGEX-98 foram utilizados primordialmente receptores GPS/GLONASS de dupla frequência.

Os resultados obtidos na campanha superaram as expectativas. Onze organizações diferentes calcularam órbitas precisas para os satélites GLONASS. As comparações feitas entre o PZ-90 e o WGS-84 confirmaram a existência de rotação em torno do eixo Z de 0,3 a 0,4 segundos de arco e translação de 1 metro ao longo do eixo Z.

2.9 EFEMÉRIDES

As efemérides são constituídas pelo conjunto de coordenadas que definem a posição orbital dos satélites em função do tempo, podendo ser classificadas em Transmitidas ou Pós-Calculadas.

As efemérides transmitidas são obtidas através da extrapolação das efemérides de referência (que são uma estimativa inicial da trajetória do satélite) para os dias subsequentes. As efemérides fazem parte da mensagem transmitida pelo satélite, e permitem o posicionamento em tempo real. A precisão destas efemérides depende da "idade" do seu armazenamento na memória dos satélites.

No GPS as efemérides proporcionam os valores dos elementos keplerianos e suas variações temporais, referenciados ao sistema WGS-84. No GLONASS fornecem os vetores posição, velocidade e aceleração em coordenadas cartesianas, referenciadas ao PZ-90. Outra informação presente nas efemérides do GLONASS é a correção para compatibilizar o tempo GLONASS ao UTC(SU), o número de *leap seconds* desde o dia 6 de janeiro de 1980 e correções para o oscilador de frequência do satélite (LANGLEY, 1997).

As efemérides Pós-Calculadas são uma estimativa da posição dos satélites para um determinado período de observação. Exemplos deste tipo de efemérides, no caso do GPS, são aquelas calculadas pelo NSWC (*U. S. Naval Surface Weapons Center*) e também aquelas advindas do Serviço Internacional GPS para a Geodinâmica, conhecidas pela sigla IGS (SANTOS, 1990). No caso do GLONASS estão sendo realizados experimentos, também pelo IGS, com o objetivo de obter órbitas Pós-Calculadas para este sistema. Neste sentido foram realizados

experimentos internacionais, denominados de Campanhas IGEX, nos anos de 1999 e 2000.

Nas tabelas 2.6 e 2.7 a seguir mostra-se fragmentos de arquivos de navegação no formato RINEX⁴, respectivamente para os sistemas GPS e GLONASS.

TABELA 2.6 – SEGMENTO DE ARQUIVO DE NAVEGAÇÃO GPS

2.10	N: GPS NAV DATA			RINEX VERSION / TYPE
Pinnacle 1.00		22-MAR-01 11:24		PGM / RUN BY / DATE
build January 19, 2000				COMMENT
.1676D-07 .2235D-07 -.1192D-06 -.1192D-06				ION ALPHA
.1208D+06 .1310D+06 -.1310D+06 -.1966D+06				ION BETA
.133179128170D-06 .107469588780D-12 552960			39	DELTA-UTC:A0,A1,T,W
6				LEAP SECONDS
				END OF HEADER
1 00 5 6 14 0 0.0	.127905514091D-03	.159161572810D-11	.000000000000D+00	
.146000000000D+03	.553125000000D+01	.454661795632D-08	.371598972440D+00	
.359490513802D-06	.516417296603D-02	.948458909988D-05	.515372938919D+04	
.568800000000D+06	-.707805156708D-07	-.183995432761D+01	-.558793544769D-08	
.960111611062D+00	.198125000000D+03	-.170661225296D+01	-.799283293357D-08	
.643241079287D-09	.000000000000D+00	.106000000000D+04	.000000000000D+00	
.200000000000D+01	.000000000000D+00	-.325962901115D-08	.402000000000D+03	
.568799000000D+06				
1 00 5 6 16 0 0.0	.127917155623D-03	.159161572810D-11	.000000000000D+00	
.147000000000D+03	.781250000000D+01	.458090509880D-08	.142183620018D+01	
.322237610817D-06	.516430172138D-02	.973418354988D-05	.515372885132D+04	
.576000000000D+06	-.428408384323D-07	-.184001190075D+01	-.558793544769D-07	
.960116264605D+00	.192375000000D+03	-.170670261741D+01	-.797247494272D-08	
.641098132882D-09	.000000000000D+00	.106000000000D+04	.000000000000D+00	
.200000000000D+01	.000000000000D+00	-.325962901115D-08	.403000000000D+03	
.575999000000D+06				
4 00 5 6 13 59 44.0	.783673021942D-03	.682121026330D-12	.000000000000D+00	
.200000000000D+01	-.436562500000D+02	.444839957941D-08	-.184552354409D+00	
-.233389437199D-05	.525718030985D-02	.983476638794D-06	.515375312424D+04	
.568784000000D+06	.558793544769D-07	.234995038864D+01	-.540167093277D-07	
.976575561766D+00	.369656250000D+03	-.557096039846D+00	-.841713632180D-08	
-.218223375594D-09	.000000000000D+00	.106000000000D+04	.000000000000D+00	
.200000000000D+01	.000000000000D+00	-.605359673500D-08	.200000000000D+01	
.568799000000D+06				
4 00 5 6 16 0 0.0	.783678144217D-03	.682121026330D-12	.000000000000D+00	
.300000000000D+01	-.389375000000D+02	.451411660250D-08	.867818011235D+00	
-.216439366341D-05	.525733793620D-02	.536441802979D-06	.515375371742D+04	
.576000000000D+06	.447034835815D-07	.234988957074D+01	.000000000000D+00	
.976573760914D+00	.374406250000D+03	-.557000378170D+00	-.845392356842D-08	
-.233938315898D-09	.000000000000D+00	.106000000000D+04	.000000000000D+00	
.200000000000D+01	.000000000000D+00	-.605359673500D-08	.300000000000D+01	
.575999000000D+06				

Nas tabelas 2.6 e 2.7 pode-se observar fragmentos de arquivos de navegação do GPS e do GLONASS respectivamente, compostos por diversas informações, dentre as quais pode-se destacar: parâmetros para descrever a

⁴ O formato RINEX é um formato universal para armazenagem de dados, composto por arquivos de observação, de navegação e meteorológicos.

posição dos satélites (elementos keplerianos e suas variações temporais, no caso do GPS e coordenadas cartesianas geocêntricas e derivadas, no caso do GLONASS), correções para os erros dos relógios dos satélites, parâmetros ionosféricos, idade dos dados, saúde dos satélites, dentre outras. No caso da mensagem do GLONASS, destaca-se ainda a presença de um espaço dedicado a especificar o número da frequência do satélite. Cada tipo de informação ocupa uma posição específica (em termos de linha/coluna) no arquivo, seguindo os padrões de formatação estabelecidos para cada tipo de arquivo.

TABELA 2.7 – SEGMENTO DE ARQUIVO DE NAVEGAÇÃO GLONASS

2.10 GLONASS NAVMESS DATA				RINEX VERSION / TYPE		
Pinnacle 1.00				22-MAR-01 11:24		
build January 19, 2000				PGM / RUN BY / DATE		
2000 5 6 .186264514923D-06				COMMENT		
				CORR TO SYSTEM TIME		
				END OF HEADER		
1 00	5 6 14 15	0.0 .554434955120D-04	.909494701773D-12	.513000000000D+05		
	.140458198242D+05	.852575302124D+00	.186264514923D-08	.000000000000D+00		
	-.189860429688D+05	-.101773834229D+01	.931322574615D-09	.200000000000D+01		
	-.964972021484D+04	.325843715668D+01	.279396772385D-08	.000000000000D+00		
1 00	5 6 14 45	0.0 .554444268346D-04	.909494701773D-12	.531000000000D+05		
	.149398837891D+05	.159140586853D+00	.372529029846D-08	.000000000000D+00		
	-.203712011719D+05	-.482919692993D+00	.931322574615D-09	.200000000000D+01		
	-.348725390625D+04	.354433250427D+01	.279396772385D-08	.000000000000D+00		
8 00	5 6 14 15	0.0 .426466576755D-03	.181898940355D-11	.513000000000D+05		
	.201326264648D+05	-.976320266724D+00	.558793544769D-08	.000000000000D+00		
	-.131260644531D+05	.659097671509D+00	.000000000000D+00	.800000000000D+01		
	.845470703125D+04	.333758735657D+01	.186264514923D-08	.100000000000D+01		
8 00	5 6 14 45	0.0 .426469370723D-03	.181898940355D-11	.531000000000D+05		
	.179945830078D+05	-.135529518127D+01	.651925802231D-08	.000000000000D+00		
	-.112897187500D+05	.138758659363D+01	-.931322574615D-09	.800000000000D+01		
	.140563066406D+05	.284579277039D+01	.931322574615D-09	.100000000000D+01		
11 00	5 6 14 15	0.0 -.586556270719D-04	.909494701773D-12	.513000000000D+05		
	.100444360352D+05	.638024330139D+00	-.931322574615D-09	.000000000000D+00		
	-.473266894531D+04	.307649135590D+01	.000000000000D+00	.400000000000D+01		
	-.229773750000D+05	-.369004249573D+00	.279396772385D-08	.100000000000D+01		
11 00	5 6 14 45	0.0 -.586537644267D-04	.909494701773D-12	.531000000000D+05		
	.115961538086D+05	.107061481476D+01	-.931322574615D-09	.000000000000D+00		
	.705949707031D+03	.291693592072D+01	.000000000000D+00	.400000000000D+01		
	-.227469125977D+05	.622982978821D+00	.279396772385D-08	.100000000000D+01		
13 00	5 6 14 15	0.0 -.624628737569D-04	-.272848410532D-11	.513000000000D+05		
	-.698709570312D+04	-.283045768738D+00	.000000000000D+00	.000000000000D+00		
	-.242777480469D+05	-.463765144348D+00	.279396772385D-08	.600000000000D+01		
	.377738476562D+04	-.352477169037D+01	-.931322574615D-09	.000000000000D+00		
13 00	5 6 14 45	0.0 -.624675303698D-04	-.272848410532D-11	.531000000000D+05		
	-.732178125000D+04	-.488519668579D-01	.000000000000D+00	.000000000000D+00		
	-.243231997070D+05	.403380393982D+00	.279396772385D-08	.600000000000D+01		
	-.263101269531D+04	-.354960536957D+01	.000000000000D+00	.000000000000D+00		

Na tabela 2.8 mostra-se um fragmento de arquivo de observação GPS/GLONASS, no formato RINEX. Os arquivos de observação GPS/GLONASS, possuem um cabeçalho composto por diversas informações tais como: distinção entre os satélites GPS e GLONASS (letra "R" para indicar satélites GLONASS e "G"

TABELA 2.8 – SEGMENTO DE ARQUIVO DE OBSERVAÇÃO GPS/GLONASS

OBSERVATION DATA				M (MIXED)				RINEX VERSION / TYPE			
Pinnacle 1.00				22-MAR-01 11:24				PGM / RUN BY / DATE			
Build January 19, 2000								COMMENT			
-Unknown-				-Unknown-				OBSERVER / AGENCY			
Begin Pinnacle project								COMMENT			
March 22, 2001 11:08:45 am								COMMENT			
RM010506c_0531								MARKER NAME			
RM010506c_0531								MARKER NUMBER			
MT311130531				JPS LEGACY				2.0 Dec,17,1999 pl3			
3763761.8926 -4365133.9706 -2724386.4805								REC # / TYPE / VERS			
0.0000 0.0000 0.0000								ANT # / TYPE			
1 1								APPROX POSITION XYZ			
7 L1 L2 C1 P1 P2 D1 D2								ANTENNA: DELTA H/E/N			
15.000								WAVELENGTH FACT L1/2			
2000 5 6 14 0 0.0000000				GPS				# / TYPES OF OBSERV			
2000 5 6 14 20 0.0000000				GPS				INTERVAL			
13								TIME OF FIRST OBS			
13								TIME OF LAST OBS			
R 1 81 81 81 81 81 81 81								LEAP SECONDS			
R 8 81 78 81 77 78 81 78								# OF SATELLITES			
R11 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
R13 78 78 78 78 78 78 78								PRN / # OF OBS			
G 1 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
G 4 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
G 8 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
G13 29 29 29 29 29 29 29								PRN / # OF OBS			
G16 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
G18 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
G19 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
G22 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
G27 81 81 81 81 81 81 81								PRN / # OF OBS			
								END OF HEADER			
00 5 6 14 0 0.0000000 0 11G19G16G 1G18G22G27G 4G 8R11R 1R 8											
105503242.435 82210340.4844 20076608.243 8 20076607.98946 20076608.34446											
153.643 119.723											
105593515.440 82280611.7574 20093770.975 8 20093770.34546 20093770.87046											
979.947 763.594											
110857237.708 86382288.3694 21095442.453 7 21095442.10045 21095443.65045											
-453.743 -353.564											
114459620.273 89189280.8804 21780939.084 7 21780938.85945 21780940.36345											
1034.601 806.182											
121643009.760 94786770.5794 23147904.601 6 23147904.23644 23147909.16044											
-1240.150 -966.348											
115138922.007 89718649.8104 21910200.181 6 21910200.45844 21910203.22244											
2547.158 1984.794											
119235280.937 92910592.4374 22689719.726 6 22689720.39643 22689723.47943											
793.256 618.124											
120610371.098 93982060.0864 22951367.221 6 22951367.04042 22951371.34843											
2736.562 2132.384											
110582430.779 86010233.9344 20665404.719 7 20665406.05047 20665405.09745											
-2494.595 -1940.236											
101857739.702 79222642.9484 19047895.068 8 19047894.97348 19047895.84446											
513.119 399.090											
111476655.366 86704060.6894 20802913.134 8 20802913.05448 20802913.92745											
-3389.711 -2636.438											
00 5 6 14 0 15.0000000 0 11G19G16G 1G18G22G27G 4G 8R11R 1R 8											
105500988.905 82208584.4854 20076179.384 8 20076178.95646 20076179.41446											
147.387 114.847											

para indicar satélites GPS), nome do programa utilizado para criar o arquivo, data de criação do arquivo, especificação da antena e receptor utilizados, posição

aproximada da estação de observação (em WGS-84), altura e centro de fase da antena, tipos de observáveis. As diferentes observáveis existentes nos arquivos possuem uma codificação, descrita a seguir: L1, L2, medidas de fase nas portadoras L1 e L2; C1, pseudo-distância utilizando o código C/A; P1, P2, pseudo-distâncias utilizando o código P, nas portadoras L1 e L2; D1, D2, frequência Doppler nas portadoras L1 e L2. Ainda no cabeçalho tem-se o valor da taxa de gravação de dados, horários do início e final do arquivo, número de *leap seconds* desde 6 de janeiro de 1980, quantidade total de satélites rastreados e quantidade observações para cada tipo de observável armazenada no arquivo.

Após o cabeçalho são apresentados especificamente os dados de observação, em blocos distintos para cada época de rastreo. Na primeira linha de cada bloco tem-se o ano, mês, dia e horário da observação e também a indicação de quais satélites GPS e GLONASS foram rastreados. Nas linhas seguintes estão armazenadas as informações, para cada observável e satélite rastreado. Para maiores informações à respeito do formato RINEX consultar (GURTNER, 1997).

3 MÉTODOS E MODELOS MATEMÁTICOS

3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE MEDIÇÃO

Os sistemas de posicionamento global permitem a obtenção da distância satélite-receptor através da utilização dos códigos ou das portadoras. A observável obtida com os códigos é denominada de pseudo-distância enquanto que a obtida com as portadoras é a medida da fase de batimento da portadora.

O NAVSTAR-GPS (*NAVigation with Time and Ranging Global Positioning System*) e o GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) são sistemas de rádio navegação baseados em satélites. Seu princípio de funcionamento é baseado na medida de pseudo-distâncias entre um receptor e quatro satélites, com o objetivo de fornecer aos usuários posicionamento tridimensional preciso, navegação e informações sobre o tempo do sistema. Tiveram sua configuração planejada de tal forma que, em qualquer lugar da Terra, tenha-se pelo menos quatro satélites visíveis acima do horizonte, continuamente. Foram desenvolvidos, inicialmente como sistemas militares, com acesso limitado aos usuários civis. Têm sido usados em aplicações geodésicas desde 1983 (SANTOS, 1990). O princípio básico de medida destes sistemas é mostrado na figura 3.1.

Considerando-se apenas o aspecto geométrico do posicionamento é possível obter a posição de um ponto à partir de observações a três satélites. Isto pode ser verificado através da expressão (3.1), na qual observa-se que existem apenas três incógnitas a serem determinadas: coordenadas X, Y e Z do ponto de interesse.

$$\rho = [(X_s - X_r)^2 + (Y_s - Y_r)^2 + (Z_s - Z_r)^2]^{1/2} \quad (3.1)$$

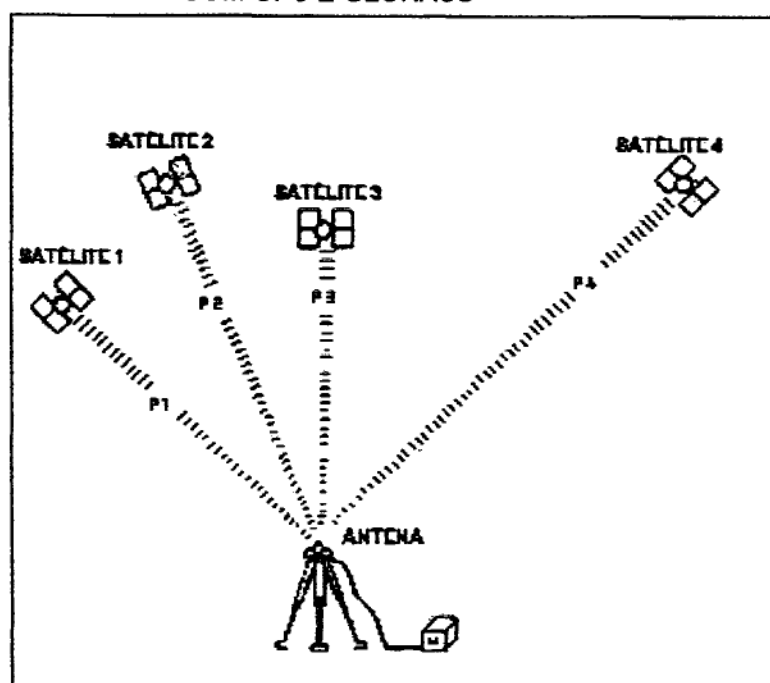
onde:

X_s, Y_s, Z_s são as coordenadas do satélite

X_r, Y_r, Z_r são as coordenadas do receptor

ρ é a distância satélite-receptor

FIGURA 3.1 – PRINCÍPIO BÁSICO DO POSICIONAMENTO COM GPS E GLONASS



(FONTE: SEEBER, 1993)

Devido ao não sincronismo entre os relógios dos satélites e dos receptores existe uma incógnita adicional agregada ao problema, o tempo. Desta forma, para obter o posicionamento tridimensional, é necessário que se tenha uma observação adicional, de modo a formar um sistema composto por no mínimo quatro equações de observação.

3.1.1 Medidas de pseudo-distância

Nas medidas de pseudo-distâncias empregando os códigos utiliza-se um procedimento denominado de correlação, no qual obtém-se o intervalo de tempo necessário para realizar o alinhamento entre o código gerado no satélite e a sua réplica, gerada pelo receptor (WELLS et al., 1986). O código recebido do satélite está atrasado de um intervalo de tempo Δt , correspondente ao tempo gasto pelo sinal para percorrer a distância satélite-receptor. No processo de correlação procura-se efetuar o alinhamento (correlação máxima) entre os dois códigos, atrasando-se o código gerado pelo receptor. Após estarem alinhados, o produto dos códigos fornece apenas valores +1.

As medidas com pseudo-distâncias podem ser representadas através da expressão 3.2, dada a seguir:

$$PR = \Delta tc = (T - t)c \quad (3.2)$$

onde:

PR é a pseudo-distância;

t é o instante da transmissão do sinal pelo satélite (no sistema de tempo do satélite);

T é o instante da recepção do sinal pelo receptor (no sistema de tempo do relógio do receptor);

c é a velocidade de propagação da luz no vácuo.

As medidas realizadas com o GPS e o GLONASS, empregando observações de pseudo-distâncias ou fase da portadora estão afetadas por uma série de efeitos sistemáticos, representados pela imprecisão dos relógios dos satélites e dos receptores, pelo atraso provocado pela passagem dos sinais pela troposfera e ionosfera, pela incerteza nos parâmetros orbitais e pela ambigüidade do ciclo inteiro, sendo que o último efeito citado existe apenas para observações com a fase da portadora (SANTOS, 1990).

Considerando-se a influência destes erros obtém-se a expressão (3.3), que representa a equação de observação para pseudo-distâncias, modelo fundamental para o qual o GPS e o GLONASS foram concebidos (SANTOS, 1990).

$$PR_k^p = \rho_k^p + c(dt^p - dt_k) + I_k^p + T_k^p + M_{PR,k}^p + \varepsilon_{PR,k}^p \quad (3.3)$$

onde:

PR_k^p é a pseudo-distância observada, correspondente à distância entre o satélite p e o receptor k;

ρ_k^p é a distância geométrica entre o satélite p e o receptor k;

dt^p é o erro do relógio do satélite p;

dt_k é o erro do relógio do receptor k;

I_k^p é o atraso ionosférico;

T_k^p é o atraso troposférico;

$M_{PR,k}^p$ é o erro devido ao multicaminho do código;

$\varepsilon_{PR,k}^p$ é o erro devido aos efeitos aleatórios e não modelados presentes nas observações de pseudo-distância.

3.1.2 Medidas com a fase da portadora

A medida da fase de frequência de batimento da portadora corresponde a diferença de fase entre o sinal gerado pelo oscilador do receptor e o sinal transmitido pelo satélite e recebido pelo receptor. As medidas com a fase da portadora podem ser representadas por (SANTOS, 1990):

$$\phi = \phi(t) - \phi(T) \quad (3.4)$$

onde:

ϕ é a fase de batimento da portadora;

$\phi(t)$ é a fase do sinal transmitido pelo satélite nos instante t, medida em ciclos;

$\phi(T)$ é a fase do sinal gerado pelo receptor no instante em que o sinal transmitido pelo satélite chega ao receptor.

As observações realizadas com a fase da portadora estão sujeitas às mesmas fontes de erro que afetam as pseudo-distâncias. Porém neste caso existe mais um termo nas equações, representado pela ambigüidade do ciclo. Desta forma obtém-se a expressão (3.5), que representa a equação para observações com a fase da portadora (SANTOS, 1990):

$$\varphi_k^p = \frac{1}{\lambda^p} \rho_k^p + \frac{c}{\lambda^p} (dt^p - dt_k) + N_k^p - \frac{1}{\lambda^p} I_k^p + \frac{1}{\lambda^p} T_k^p + M_{\varphi,k}^p + \varepsilon_{\varphi,k}^p \quad (3.5)$$

onde:

φ_k^p é a medida de fase da onda portadora entre o satélite p e o receptor k;

λ^p é o comprimento da onda portadora para o satélite p;

$\varepsilon_{\varphi,k}^p$ é o erro devido aos efeitos aleatórios e não modelados presentes nas observações com a fase da portadora;

N_k^p é a ambigüidade do ciclo da fase da portadora entre o satélite p e o receptor k;

$M_{\varphi,k}^p$ é o erro devido ao multicaminho da fase da portadora.

As equações de medida para observações com pseudo-distâncias, equação (3.3), fase da portadora, equação (3.5), são consideradas como medidas de distância, influenciadas pelos mesmos erros sistemáticos. A diferença fundamental entre as duas expressões é a presença da ambigüidade. A ambigüidade representa o número inteiro de ciclos contidos na distância satélite-receptor, no instante do começo da medida de fase. Este valor, desconhecido no início do rastreo, permanece invariável a menos que ocorra alguma perda de sinal. O receptor é capaz de contar as variações do ciclo inteiro, provocadas pela mudança da distância satélite-receptor com o passar do tempo (WELLS et al., 1986). A ambigüidade é uma incógnita presente em cada observação, existindo uma ambigüidade para cada par satélite-receptor. Esta incógnita deve ser determinada⁵ em três situações: no início de cada rastreo, quando um novo satélite começa a ser rastreado e quando ocorrem perdas de sinal.

3.1.3 Precisão dos Métodos

As observações fundamentais dos sistemas GPS e GLONASS fornecem diferentes níveis de precisão. A avaliação de sua precisão pode ser feita por duas regras práticas apresentadas por WELLS et al., 1986.

A primeira regra apresentada relaciona a precisão da medida da pseudo-distância à precisão com a qual o pico da correlação pode ser mantido. Isto corresponde a 1% do período entre épocas sucessivas do código (representa o ruído estatístico da correlação do código). Desta forma, para o código P cujas épocas sucessivas são de aproximadamente 0,1 μ s, tem-se uma precisão de 1ns que, multiplicada pela velocidade da luz, fornece o valor de 30 cm. Analogamente para o código C/A, tem-se precisão de 3m.

⁵ Deve-se destacar que as técnicas para a resolução de ambigüidades utilizam as diferenças de observações, através das equações de simples e dupla diferenças de fase.

Para medidas com a fase da portadora, a regra estabelece que a precisão pode ser de até 1% do comprimento de onda. Desta forma, para a portadora L1 do GPS, cujo comprimento de onda é de 19,7 cm, a precisão é de 2mm.

3.2 COMBINAÇÕES LINEARES DE OBSERVAÇÕES

Conforme mencionado anteriormente as observações realizadas com o GPS e o GLONASS estão afetadas por diversos efeitos sistemáticos, representados pela imprecisão nos relógios dos satélites e receptores, passagem dos sinais através da atmosfera, incerteza nos parâmetros orbitais, multicaminho do sinal e ruídos nas observações. Devido à influência destes erros obtém-se precisão de apenas alguns metros no posicionamento absoluto, o que é insuficiente para aplicações geodésicas.

Contudo, se observações simultâneas à partir de dois ou mais receptores são realizadas, os efeitos sistemáticos podem ser eliminados ou reduzidos, pois em tal condição podem ser correlacionados. Este princípio é utilizado no posicionamento relativo, no qual emprega-se estas correlações visando obter melhores precisões, através da eliminação ou redução de alguns dos efeitos sistemáticos presentes nas observações. Este princípio é implementado mediante a realização de diferenças entre medidas, obtidas através de observações com o emprego dos códigos ou com a fase da portadora (SANTOS, 1990).

Os sistemas GPS e GLONASS apesar de terem características muito semelhantes, possuem algumas distinções que devem ser destacadas quando pretende-se associar os dois sistemas. No que se refere ao processamento de dados combinados GPS e GLONASS, a principal dificuldade está relacionada com as técnicas de transmissão de sinais empregadas. O GPS emprega a técnica CDMA (*code division multiple access*), na qual todos os satélites utilizam a mesma frequência para transmissão dos sinais, um para cada portadora. O GLONASS utiliza a técnica FDMA (*frequency division multiple access*), na qual cada satélite possui uma frequência específica para transmitir os sinais de cada satélite, dispondo de um intervalo de frequência para cada portadora.

As combinações lineares de observações, extensivamente utilizadas no processamento de dados GPS, estão adaptadas para as características de

transmissão de sinais do GPS. A técnica empregada no sistema russo, conduz a algumas dificuldades no processamento de dados GLONASS e GPS/GLONASS. Desta forma é necessário adaptar os procedimentos normalmente adotados, em função das características do GLONASS.

Para evidenciar as dificuldades encontradas no processamento de dados combinados GPS e GLONASS, apresenta-se a seguir os modelos matemáticos envolvidos nas observações de pseudo-distância e fase da portadora, bem como as expressões de simples e dupla diferença, válidas para observações GPS/GLONASS.

3.2.1 Modelos Matemáticos para as Observáveis Fundamentais

Os modelos matemáticos utilizados para descrever respectivamente observações de pseudo-distância e fase da portadora, válidos para observações GPS e GLONASS são repetidos a seguir:

$$PR_k^p = \rho_k^p + c(dt^p - dt_k) + I_k^p + T_k^p + M_k^p + \varepsilon_{PR,k}^p \quad (3.3)$$

$$\varphi_k^p = \frac{1}{\lambda^p} \rho_k^p + \frac{c}{\lambda^p} (dt^p - dt_k) + N_k^p - \frac{1}{\lambda^p} I_k^p + \frac{1}{\lambda^p} T_k^p + M_k^p + \varepsilon_{\varphi,k}^p \quad (3.5)$$

Na expressão (3.6) a seguir escreve-se novamente a equação (3.5), em função da frequência, obtendo-se equações distintas para o GPS e o GLONASS, em função do sistema de transmissão de sinais utilizado em cada sistema.

$$\varphi_k^p = \frac{f^p}{c} \rho_k^p + f^p (dt^p - dt_k) + N_k^p - \frac{f^p}{c} I_k^p + \frac{f^p}{c} T_k^p + M_k^p + \varepsilon_{\varphi,k}^p \quad (3.6)$$

3.2.2 Simples Diferenças de Observações para os Sistemas GPS e GLONASS

As equações de simples diferença são geradas à partir das observáveis fundamentais. Para obtê-las considera-se que em duas estações de observação, k e m , realiza-se medidas simultâneas a um satélite p . Desta forma obtém-se os seguintes modelos matemáticos:

$$PR_{km}^p = \rho_{km}^p + c(dt_m - dt_k) + I_{km}^p + T_{km}^p + \varepsilon_{PR,km}^p \quad (3.7)$$

$$\varphi_{km}^p = \frac{f^p}{c} \rho_{km}^p + f^p (dt_m - dt_k) + N_{km}^p - \frac{f^p}{c} I_{km}^p + \frac{f^p}{c} T_{km}^p + \varepsilon_{\varphi,km}^p \quad (3.8)$$

A simples diferença de fase possibilita uma expressiva redução dos erros causados pela refração atmosférica, desde que a distância entre as estações de observação seja pequena, quando comparada com os 20.000 km de altitude dos satélites. Neste caso, pode-se considerar que os efeitos causados pela refração atmosférica e ionosférica são iguais, pois os sinais percorrem a camada atmosférica em regiões bem próximas. Considera-se este raciocínio para linhas de base de no máximo 100 km. A modelagem citada possibilita ainda uma redução dos erros causados pela incerteza dos parâmetros orbitais transmitidos (SANTOS, 1990). Após estas considerações as equações (3.4) e (3.5) podem ser reescritas da seguinte forma:

$$PR_{km}^p = \rho_{km}^p + c(dt_m - dt_k) + \varepsilon_{PR,km}^p \quad (3.9)$$

$$\varphi_{km}^p = \frac{f^p}{c} \rho_{km}^p + f^p(dt_m - dt_k) + N_{km}^p + \varepsilon_{\varphi,km}^p \quad (3.10)$$

3.2.3 Duplas Diferenças de Observações para os Sistemas GPS e GLONASS

Para obter as equações de dupla diferença considera-se que à partir das estações de observação k e m, observa-se simultaneamente os satélites p e q. Neste procedimento obtém-se a diferença entre duas equações de simples diferença de uma mesma época. Seus modelos matemáticos são expressos pelas equações (3.11) e (3.12), dadas a seguir:

$$PR_{km}^{pq} = \rho_{km}^{pq} + \varepsilon_{PR,km}^{pq} \quad (3.11)$$

$$\varphi_{km}^{pq} = \frac{f}{c} \rho_{km}^{pq} + f^p(dt_m - dt_k) - f^q(dt_m - dt_k) + N_{km}^{pq} + \varepsilon_{\varphi,km}^{pq} \quad (3.12)$$

A equação (3.12) representa o modelo matemático para a dupla diferença de fase no caso de observações GLONASS. Nesta equação observa-se que os termos devidos aos erros dos relógios dos receptores não são eliminados, pois tem-se uma frequência distinta para cada satélite. No caso de observações GPS, no qual todos os satélites empregam a mesma frequência para transmissão dos dados da fase da portadora, tem-se $\lambda_p = \lambda_q = \lambda$. Desta forma, os erros relativos ao relógio do receptor podem ser eliminados da equação (3.12), obtendo-se (MONICO, 1999):

$$\phi_{km}^{pq} = \frac{f}{c} \rho_{km}^{pq} + N_{km}^{pq} + \varepsilon_{\phi,km}^{pq} \quad (3.13)$$

3.2.4 Soluções para a Dupla Diferença de Fase do GLONASS

Diversas metodologias têm sido propostas na literatura visando solucionar as equações de dupla diferença para observações GLONASS. O objetivo destes modelos é avaliar o erro do relógio do receptor presente nas equações, mediante algum procedimento. Genericamente, os procedimentos são divididos em duas categorias distintas, baseadas na eliminação ou na estimativa do erro do relógio do receptor (WANG, 1999).

O procedimento convencional da dupla diferença de fase, aplicado no processamento de dados GLONASS ou GPS/GLONASS conduz a um sistema de equações normais singular. Isto ocorre porque o sistema depende da resolução do erro do relógio do receptor (LEICK, 1998).

Diversos autores apresentam metodologias para solucionar as equações de dupla diferença de fase com dados GLONASS. Dentre eles pode-se citar: (WANG, 1999); (HAN, DAÍ and RIZOS, 1999); (RABY and DALY, 1993); (PRATT and MISRA, 1998); (HABRICH et al., 1999); (ROSSBACH and HEIN, 1996); (LEICK et al. 1995); (LEICK, 1998); (MONICO, 1999).

3.2.4.1 Métodos que eliminam os erros dos relógios dos receptores

WANG (1999) aborda três estratégias distintas para remover os parâmetros associados aos erros dos relógios dos receptores das equações de dupla diferença do GLONASS.

Na primeira estratégia apresentada os erros dos relógios dos satélites são estimados à partir das equações de simples diferença de pseudo-distâncias e inseridos nos modelos matemáticos de dupla diferença de fase. Neste procedimento a equação (3.12) pode ser escrita da seguinte forma (LEICK, 1998):

$$\phi_{km}^{pq} + (f^p - f^q)(dt_m - dt_k) = \frac{f^p}{c} \rho_{km}^p - \frac{f^q}{c} \rho_{km}^q + N_{km}^{pq} \quad (3.14)$$

Neste caso, utiliza-se normalmente observações de quatro satélites, de forma a estimar as coordenadas do receptor e o erro do relógio do receptor ao mesmo tempo (LEICK, 1998). O problema desta solução é a incerteza nas medidas de pseudo-distâncias, as quais afetam as estimativas dos erros dos relógios dos receptores. Estas estimativas após serem introduzidas nas equações de dupla diferença, afetarão as estimativas das coordenadas e as ambigüidades, pois serão tratadas como possuindo valores inteiros (MONICO, 1999).

Na segunda estratégia, os erros dos relógios dos receptores são eliminados transformando as observações da fase da portadora em unidades de distância antes de calcular as duplas diferenças, obtendo-se (LEICK, 1998):

$$\begin{aligned}\phi_{km}^{pq} &= \frac{c}{f^p} \phi_{km}^p - \frac{c}{f^q} \phi_{km}^q \\ \phi_{km}^{pq} &= \rho_{km}^{pq} + \frac{c}{f^p} N_{km}^p - \frac{c}{f^q} N_{km}^q \\ \phi_{km}^{pq} &= \rho_{km}^{pq} + R_{km}^{pq}\end{aligned}\tag{3.15}$$

Os termos dos relógios também podem ser eliminados quando transforma-se a fase da portadora para uma frequência média f_{GLO} . Desta forma pode-se escrever novamente a equação (3.12) da seguinte forma (LEICK, 1998):

$$\begin{aligned}\phi_{km,GLO}^{pq} &= \frac{f_{1,GLO}}{f_1^p} \phi_{km}^p - \frac{f_{1,GLO}}{f_1^q} \phi_{km}^q \\ \phi_{km,GLO}^{pq} &= \frac{f_{1,GLO}}{c} \rho_{km}^{pq} + \frac{f_{1,GLO}}{f_1^p} N_{km}^p - \frac{f_{1,GLO}}{f_1^q} N_{km}^q \\ \phi_{km,GLO}^{pq} &= \frac{f_{1,GLO}}{c} \rho_{km}^{pq} + R_{km,GLO}^{pq}\end{aligned}\tag{3.16}$$

onde: $R_{km,GLO}^{pq}$ é a nova ambigüidade da dupla diferença, a qual é uma combinação linear das ambigüidades da simples diferença.

Pode-se também escalar a frequência f_{GLO} de forma que fique localizada no meio do intervalo de frequência da portadora L1 do GLONASS. Em ambos os casos (escala de distância e escala média) a ambigüidade da dupla diferença R é uma combinação linear das ambigüidades da simples diferença e não possui valor inteiro. Desta forma, as técnicas para fixação das ambigüidades da dupla diferença, utilizadas para observações GPS, não podem ser aplicadas nesta situação. Contudo pode-se utilizar os programas de processamento GPS para dados GLONASS

escolhendo-se a frequência arbitrária f_{GLO} com valor igual ao da frequência GPS, de forma a possibilitar o processamento conjunto de dados GPS/GLONASS (MONICO, 1999).

A terceira estratégia para eliminar os erros do relógio do receptor foi estabelecida visando manter a natureza original das ambigüidades das duplas diferenças, ou seja, de ser um número inteiro. Isto pode ser obtido mediante a seguinte condição (MONICO, 1999):

$$f^* \equiv k^p f^p = k^q f^q \quad (3.17)$$

onde os termos k^p e k^q são números inteiros (ROSSBACH, 1996).

Introduzindo a expressão (3.14) na equação de dupla diferença, equação (3.13), obtém-se:

$$\begin{aligned} \phi_{km}^{pq} &= k^p \phi_{km}^p - k^q \phi_{km}^q \\ \phi_{km}^{pq} &= \frac{f^*}{c} \rho_{km}^{pq} + k^p N_{km}^p - k^q N_{km}^q \\ \phi_{km}^{pq} &= \frac{f^*}{c} \rho_{km}^{pq} + N_{km}^{pq} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Neste caso, a ambigüidade N_{km}^{pq} é um número inteiro e está relacionada ao comprimento de onda, dado pela expressão (3.19):

$$\lambda^* = \frac{c}{f^*} \quad (3.19)$$

A desvantagem deste método é a magnitude dos comprimentos de onda resultantes, os quais são da ordem do micrômetro. Desta forma, o número inteiro de ciclos será de difícil obtenção. Uma alternativa existente é fixar a ambigüidade em termos de centenas ou milhares de ciclos (MONICO, 1999).

3.2.4.2 Métodos que estimam os erros dos relógios dos receptores

Outra metodologia adotada, visando aplicar as equações de dupla diferença de fase como equação básica, é baseada na estimativa dos erros dos relógios dos receptores, à partir das equações de simples diferença de pseudo-distâncias. Neste caso as medidas de simples diferença de pseudo-distâncias e dupla diferença das medidas de fase são combinadas em um único modelo. Desta forma, para observações GLONASS, tem-se as seguintes expressões (WANG, 1999):

$$\begin{aligned}
PR_{km}^p &= \rho_{km}^p + c(dt_m - dt_k) + \varepsilon_{PR,km}^p \\
PR_{km}^q &= \rho_{km}^q + c(dt_m - dt_k) + \varepsilon_{PR,km}^q \\
\phi_{km}^{pq} &= \frac{1}{\lambda_p} \rho_{km}^p - \frac{1}{\lambda_q} \rho_{km}^q + \frac{1}{\lambda_p} N_{km}^p - \frac{1}{\lambda_q} N_{km}^q + \\
&\quad \frac{c}{\lambda_p} (dt_m - dt_k) - \frac{c}{\lambda_q} (dt_m - dt_k) + \varepsilon_{\phi,km}^{pq}
\end{aligned} \tag{3.20}$$

As observações com a fase da portadora também podem ser introduzidas no modelo, através das equações de simples diferença. Porém, se as pseudo-distâncias forem tratadas na forma de duplas diferenças, o modelo apresentará deficiência de característica, gerando um sistema de equações normais singular.

Na expressão (3.20) é possível fazer diversas combinações quando, além das observações GLONASS, dispõe-se de observações GPS. O modelo no qual se formam duplas diferenças com dados GPS/GLONASS, conhecido como modelo de formulação mista, não proporciona estimativas confiáveis. Tal fato ocorre porque as fontes de erros presentes nas observações GPS e GLONASS são diferentes. Por exemplo, o atraso sistemático entre canais é mais acentuado no caso do GLONASS (MONICO, 1999).

O modelo no qual se utilizam dados de duplas diferenças de fase na forma GPS-GPS e GLONASS-GLONASS, conhecido como modelo de formulação separada, produz resultados mais confiáveis. Além disso, existem diversas possibilidades para formar as simples diferenças de pseudo-distâncias, quando se dispõe de dados dos dois sistemas (WANG, 1999).

3.2.4.3 Estimativa aproximada da ambigüidade

Além dos modelos discutidos anteriormente existe uma formulação apresentada na literatura, utilizada para obter estimativas das ambigüidades inteiras (LEICK et al., 1995); (LEICK, 1998).

Estas estimativas são possíveis quando se dispõe de dados de dupla freqüência para a fase da portadora. A estimativa é baseada na resolução da ambigüidade *wide-lane*, com dados de dupla freqüência da fase da portadora e pseudo-distâncias, utilizando expressões conhecidas, abordadas na literatura.

Aplicando estas expressões para simples diferenças obtém-se (LEICK et al. 1995); (LEICK, 1998).

$$N_{km,e}^P = \phi_{km,w}^P - \frac{f_1^P - f_2^P}{f_1^P + f_2^P} \left[\frac{f_1^P P_{km,1}^P + f_2^P P_{km,2}^P}{c} \right] \quad (3.21)$$

onde o símbolo P indica as pseudo-distâncias e o subscrito w indica as diferenças entre as observáveis das portadoras L1 e L2, dada por:

$$\phi_{km,w}^P = \phi_{km,1}^P - \phi_{km,2}^P \quad (3.22)$$

$$N_{km,w}^P = N_{km,1}^P - N_{km,2}^P \quad (3.23)$$

A ambigüidade *wide-lane* estimada através da expressão (3.21) é arredondada para um inteiro e substituída na expressão para o cálculo da ambigüidade *extra-wide lane* dada por:

$$N_{km,1,0}^P = \phi_{km,1}^P + \frac{f_1^P}{f_1^P - f_2^P} \left[N_{km,w}^P - \phi_{km,w}^P \right] \quad (3.24)$$

O valor computado $N_{km,1,0}^P$, arredondado para um inteiro, é usado como uma aproximação para a ambigüidade da simples diferença dada pela expressão (3.16). Desta forma a equação para a dupla diferença pode ser escrita como:

$$\phi_{km,1,GLO}^{pq} - \frac{f_{1,GLO}}{f_1^P} N_{km,1,0}^P = \frac{f_{1,GLO}}{c} \rho_{km}^{pq} + \frac{f_{1,GLO}}{f_1^q} \Delta N_{km}^{pq} + \xi^{pq} \quad (3.25)$$

onde

$$\Delta N_{km,1}^{pq} = dN_{km,1}^P - N_{km,1}^q \quad (3.26)$$

$$\xi^{pq} = -\frac{f_{1,GLO}}{f_1^q} \left(\frac{f_1^P - f_1^q}{f_1^q} \right) dN_{km,1}^P \quad (3.27)$$

Se a ambigüidade estimada $N_{km,1,0}^P$ é suficientemente próxima do valor correto da ambigüidade, o termo ξ^{pq} presente na expressão (3.27) é negligenciável. Teoricamente, é possível então estimar a ambigüidade $\Delta N_{km,1}^{pq}$ da equação (3.25) e arredondá-la para um valor inteiro. O símbolo $\Delta N_{km,1}^P$ representa o erro inteiro na aproximação inicial que é combinada com $N_{km,1}^q$ na expressão (3.26).

3.2.5 Tripla Diferença de Observações

A tripla diferença de observações é utilizada somente para observações da fase da portadora. Nesta modelagem elimina-se o termo devido à ambigüidade. Neste caso realiza-se observações aos satélites p e q, à partir das estações k e m, considerando duas épocas distintas de observações. Esta metodologia pode ser aplicada desde que as observações aos dois satélites sejam contínuas e não existam perdas de sinal. Aqui, como nos casos anteriores, ocorre uma expressiva redução dos efeitos causados pela refração atmosférica. Esta modelagem é utilizada principalmente para o pré processamento de dados. A equação da tripla diferença de fase é dada por (SANTOS, 1990).

$$\phi_{km}^{pq}(1,2) = \frac{f}{c} \rho_{km}^{pq}(1,2) + \varepsilon_{\phi,km}^{pq}(1,2) \quad (3.28)$$

3.2.6 Combinação Linear entre as Fases

O objetivo original dos levantamentos empregando as portadoras L1 e L2 era a eliminação do atraso provocado pela propagação dos sinais na ionosfera. Posteriormente passou-se a fazer combinações lineares entre as portadoras, visando determinar as ambigüidades. De acordo com WÜBBENA, 1991 apud CARVALHO, 1999 é possível realizar diversas combinações, à partir da observação de quatro critérios:

- o coeficiente da combinação linear deve ser inteiro, de modo que a fixação do valor da ambigüidade resulte em um número inteiro;
- evitar que os comprimentos de onda resultantes sejam pequenos, o que dificulta a eliminação das perdas de sinal e a fixação das ambigüidades;
- utilizar combinações lineares que sofram pouca influência da ionosfera;
- utilizar combinações lineares que apresentem ruído observacional menor que o comprimento de onda dos sinais.

Na literatura são relatadas as técnicas *Narrow Lane* e *Wide Lane*, que possuem a seguinte forma geral (COUNSELMAN et. al., 1979), (HATCH, 1982):

$$\phi_{n,m} = n\phi_{L1} + m\phi_{L2} \quad (3.29)$$

onde:

$\phi_{n,m}$ é a combinação linear da fase da portadora, expressa em ciclos

n, m são os coeficientes inteiros e arbitrários;

ϕ_{L1} é a fase medida da portadora L1;

ϕ_{L2} é a fase medida da portadora L2.

3.2.6.1 Combinação linear *wide lane*

A combinação linear *wide lane* é obtida quando tem-se $n=1$ e $m=-1$, obtendo-se

$$\phi_{LW} = \phi_{L1} - \phi_{L2} \quad (3.30)$$

O comprimento de onda resultante da combinação linear *wide lane* é de 86,2 cm. A vantagem desta técnica é a possibilidade de determinar com maior facilidade as ambigüidades, pois tem-se um comprimento de onda quatro vezes maior que o das observações originais. No entanto o nível de ruído aumenta cerca de seis vezes quando comparado com o da portadora L1. Esta técnica é recomendada para o posicionamento de pontos em bases maiores do que 30 km.

3.2.6.2 Combinação linear *narrow lane*

Esta combinação linear é obtida quando tem-se $n=1$ e $m=1$, resultando em:

$$\phi_{LN} = \phi_{L1} + \phi_{L2} \quad (3.31)$$

Neste caso o comprimento de onda resultante é de 10,7 cm, proporcionando o menor nível de ruído de todas as combinações. Sua desvantagem no entanto é a difícil solução das ambigüidades. Esta técnica é recomendada para aplicação em bases curtas.

3.2.6.3 Combinação linear livre do atraso ionosférico

A combinação linear livre da ionosfera é obtida quando tem-se $n=1$ e $m=f_{L2}/f_{L1}$, obtendo-se:

$$\phi_{LC} = \phi_{L1} - (f_{L1}/f_{L2})\phi_{L2} \quad (3.32)$$

onde:

ϕ_{LC} é a fase resultante da combinação linear livre do atraso ionosférico;

f_{L1} é a frequência da fase L1;

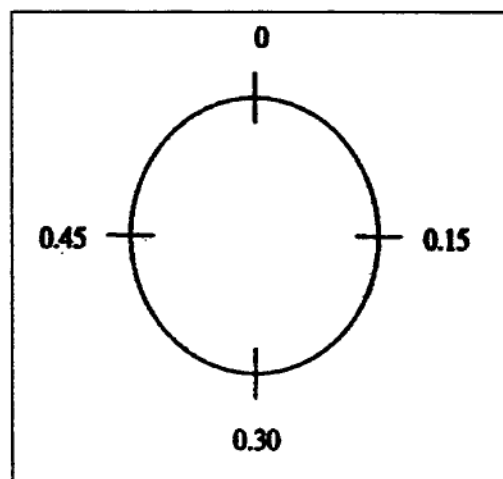
f_{L2} é a frequência da fase L2

O comprimento de onda resultante da combinação linear livre do atraso ionosférico é de 5,4 cm (WÜBBENA, 1991 apud CARVALHO, 1999). Apesar desta técnica estar livre das influências da ionosfera, possui a desvantagem de não fornecer o valor das ambigüidades como um número inteiro, não sendo adequada portanto para fornecer soluções muito precisas.

3.2.7 Determinação das Ambigüidades

A fase de batimento da portadora medida pelos receptores GPS e GLONASS é composta por uma parte fracionária, $\Delta\phi$, e uma parte inteira, n . Pode-se considerar que os receptores medem a fase como um contador circular, com variações de 0 a 1, conforme mostra a figura 3.2.

FIGURA 3.2 – CONTADOR CIRCULAR DE FASE



(FONTE: SANTOS, 1990)

No instante inicial t_0 , o ϕ_{medido} é igual a $\Delta\phi$, prosseguindo-se a medição. Quando o $\Delta\phi$ for novamente igual a zero, um ciclo terá sido completado e n será igual a um. Desta forma, cada vez que um ciclo é completado, adiciona-se uma

unidade ao contador n . De acordo com este raciocínio pode-se obter a expressão para o ϕ_{medido} , em um instante t , dada por (SANTOS, 1990):

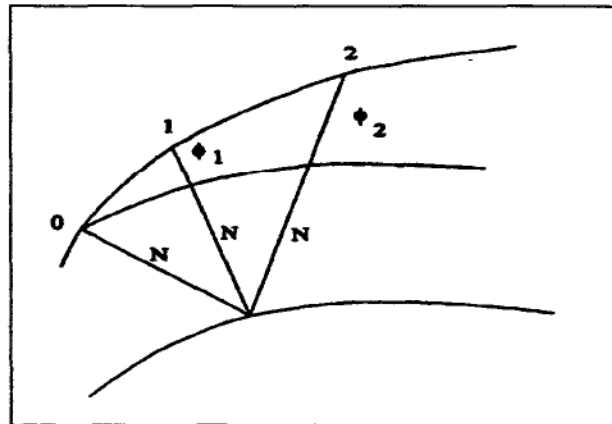
$$\phi_{\text{medido}}(t) = \Delta\phi(t) + n \quad (3.33)$$

Na figura 3.3 mostra-se a medida de fase ϕ_i nos instantes $i=0,1,2$, na qual observa-se que durante o processo de medição o número inteiro de contagens N , no instante inicial t_0 , é desconhecido. Este valor corresponde à ambigüidade do ciclo. Desta forma tem-se:

$$\phi_{\text{total}} = \phi_{\text{medido}} + N \quad (3.34)$$

que corresponde ao número total de ciclos existentes entre o satélite e o receptor. Quando ocorre um salto de ciclo, no instante t_2 por exemplo, começa-se uma nova contagem de n , e uma nova ambigüidade N é atribuída a este instante

FIGURA 3.3 – MEDIDA CONTÍNUA DA FASE À PARTIR DO INSTANTE t_0



(FONTE: SANTOS, 1990)

3.2.7.1 Técnicas para resolução das ambigüidades

Várias técnicas para resolução de ambigüidades tem sido desenvolvidas e relatadas na literatura, pois desta resolução depende o posicionamento de alta precisão. Tais técnicas podem ser aplicadas em qualquer modalidade de posicionamento, quer seja estático, cinemático ou intermediário. No método estático é mais comum a utilização de ajustamento por mínimos quadrados enquanto que nos métodos cinemáticos emprega-se as técnicas OTF (*on the fly*) onde existe a necessidade de resolver a ambigüidade durante o deslocamento da antena. Já

foram citados anteriormente, respectivamente nas seções 3.2.5 e 3.2.6, a Tripla Diferença de Fase e as Combinações Lineares (*Wide Lane* e *Narrow Lane*) que auxiliam a resolução das ambigüidades. Na sequência serão descritos algumas das técnicas utilizadas para obter a solução das ambigüidades.

a) Método Geométrico

O método geométrico baseia-se na modificação da geometria dos satélites em função do tempo. Observando o satélite por um longo período de tempo, sem que ocorram perdas de sinal, determina-se o valor da ambigüidade. Utilizando o efeito Doppler obtém-se as coordenadas da estação, a partir do que pode-se calcular a distância satélite-receptor. Esta distância é então comparada com a distância observada, que contém o termo relativo à ambigüidade. A diferença entre as duas distâncias permite a obtenção da ambigüidade. Como este método depende da mudança na geometria dos satélites, é necessário um longo período de rastreo, motivo pelo qual é utilizado em levantamentos estáticos. Este método apresenta como vantagens o fato de utilizar uma modelagem simples, empregar poucos satélites e o fato de ser adequado tanto para linhas de base curtas quanto longas. Como desvantagens tem-se a necessidade de um longo período de observação, fato que propicia a influência de efeitos sistemáticos tais como o ionosférico, o troposférico e a órbita dos satélites, além de ser sensível à não recuperação das perdas de sinal. (BLITZKOW, 1995)

b) Combinação do código e da fase da portadora

Esta técnica utiliza medidas da fase do código como comprimentos de onda adicionais para resolver as ambigüidades da fase da portadora, já que sua estrutura é conhecida (BLITZKOW, 1995). Calcula-se a diferença entre as equações da pseudo-distância (3.3) e da fase da portadora (3.5), obtendo-se a expressão (3.35):

$$\varphi_k^p - PR_k^p = \lambda N + dT_A + d\varepsilon \quad (3.35)$$

onde:

o termo dT_A representa os atrasos provocados pela propagação dos diferentes desvios dos sinais da fase e do código, ocorridos nos *hardwares* dos satélites e receptores.

Neste método existem vantagens quando se aplica dados de dupla frequência, devido às diversas combinações lineares que podem ser formadas (HOFMANN-WELLENHOF et. al., 1994). As vantagens desta técnica consistem na independência da geometria dos satélites, dos efeitos da propagação dos sinais pela atmosfera e do efeito do não sincronismo entre os relógios dos satélites e dos receptores. Como desvantagem deve-se considerar a diferença entre os efeitos do multicaminhos gerados pelos sinais e pela influência do tempo de retardo do *hardware* para os satélites e receptores, as ambigüidades da fase da portadora e os efeitos ionosféricos. Este método pode ser utilizado para bases longas ou muito longas, sendo apropriada também para aplicações cinemáticas (CARVALHO, 1999).

c) Métodos Combinados

Este método consiste na combinação das possibilidades mencionadas anteriormente, podendo-se também adicionar outras técnicas, visando obter melhores resultados. O princípio deste método é que a cada ambigüidade fixada existe a melhora e a estabilização da solução, que será utilizada na próxima iteração.

d) Método de Procura das Ambigüidades

O método de procura das ambigüidades consiste na procura da combinação linear que forneça a melhor solução. O algoritmo inicia a busca utilizando ambigüidades obtidas por uma solução flutuante. Mediante as técnicas de otimização são obtidas as ambigüidades inteiras.

A desvantagem deste método é sua sensibilidade aos erros sistemáticos e o fato de necessitar a observação da maior quantidade possível de satélites. Normalmente baseia-se no método dos mínimos quadrados e na função de mapeamento da ambigüidade.

e) Técnicas OTF (*on the fly*)

As técnicas OTF são utilizadas em levantamentos cinemáticos, nos quais os receptores estão em movimento. Nestes casos, quando ocorre uma perda de sinal, existe a necessidade de recuperar as ambigüidades durante o movimento da antena. Diversas técnicas têm sido propostas para a resolução OTF, das quais pode-se citar:

- *Extra Wide-Laning*, proposta por WÜBBENA, utilizada nos posicionamentos estático e cinemático.

- Método dos Mínimos Quadrados, proposto por MADER e REMONDI, que utiliza os resíduos das observações para medir a discordância entre as medidas e identificar a ambigüidade correta.

3.3 AVALIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DOS SATÉLITES (DOP)

A precisão na determinação da posição usando GPS ou GLONASS depende da precisão de medida da distância satélite-receptor e da configuração geométrica dos satélites, representada pelo fator DOP (*Dilution of Precision*).

O fator UERE (*User Equivalent Range Error*) representa o efeito conjunto dos erros de sincronização dos relógios do satélite e do receptor, efeitos de propagação do sinal (troposfera e ionosfera), incerteza da efemérides e ruídos. Porém para obter o erro final de medida deve-se considerar ainda o efeito causado pela configuração geométrica dos satélites.

Desta forma, o DOP fornece informações à respeito da geometria dos satélites acima do horizonte e é expresso como a seguir:

$$\sigma = \text{DOP} \times \sigma_0 \text{ ou } \sigma = \text{DOP} \times \text{UERE} \quad (3.36)$$

onde:

σ - desvio padrão da observação;

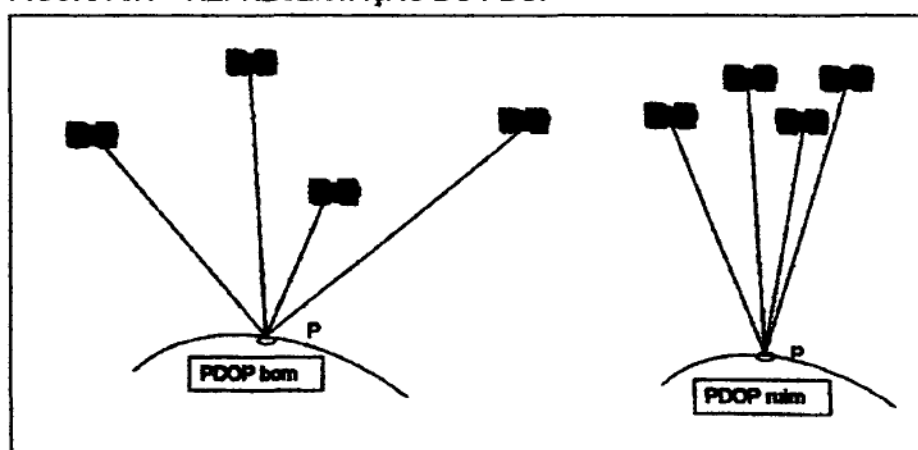
σ_0 – desvio padrão associado ao posicionamento;

DOP – efeito da geometria dos satélites.

O DOP é representado pelo inverso do volume do tetraedro formado pelos quatro satélites utilizados no posicionamento, conforme representado na figura 3.4. Existem diversos tipos de DOP, sendo que o PDOP é o mais utilizado:

- VDOP - diluição da precisão vertical;
- HDOP - diluição da precisão horizontal;
- TDOP - diluição da precisão para o tempo;
- PDOP - diluição da precisão para o posicionamento tridimensional;
- GDOP - diluição da precisão para o posicionamento tridimensional e tempo.

FIGURA 3.4 – REPRESENTAÇÃO DO PDOP



(FONTE: MÔNICO, 2000)

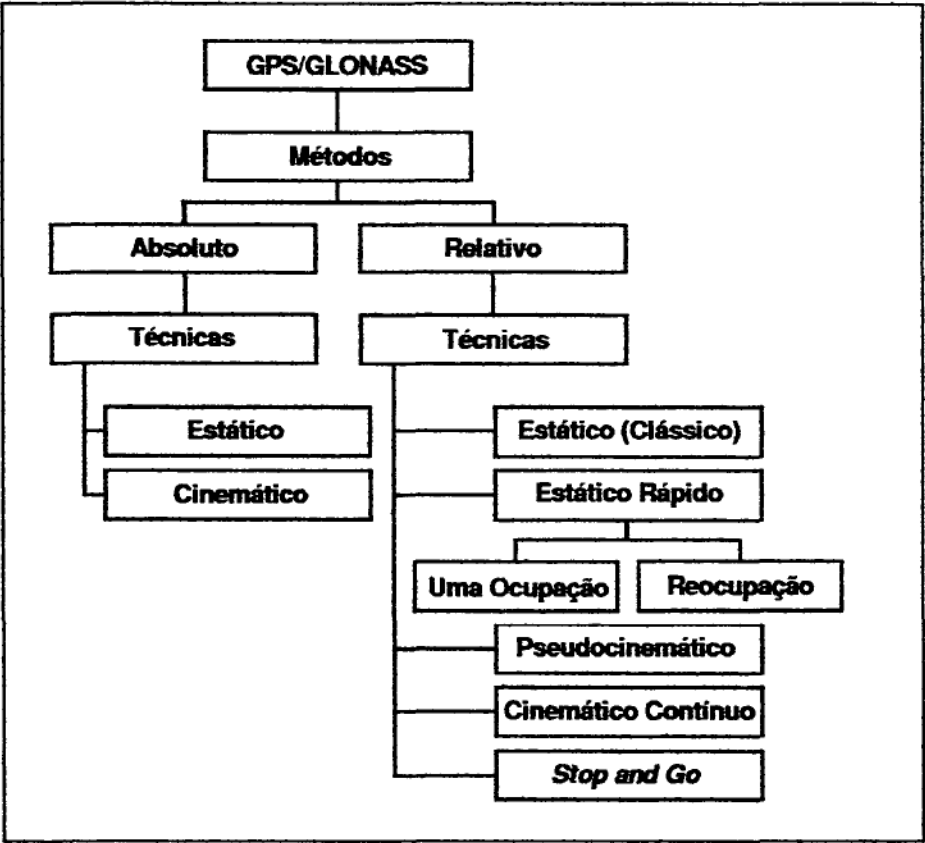
Pode-se analisar o efeito da geometria dos satélites de forma semelhante à análise das estruturas geodésicas, ou seja, quanto melhor a distribuição dos vértices maior será o ângulo formado entre as visadas. De forma análoga, quanto melhor a distribuição dos satélites maior será o ângulo formado entre as pseudo distâncias observadas à partir do receptor. Desta forma, a distribuição que fornece o melhor valor possível para o DOP, caso não existissem efeitos atmosféricos, seria três satélites localizados no horizonte e um no zênite.

3.4 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

O surgimento do GPS e do GLONASS permitiu o posicionamento de pontos sobre a superfície terrestre de forma acessível, a qualquer usuário que dispusesse de um receptor. O método utilizado inicialmente era o absoluto, com o emprego dos códigos. Houve um crescente interesse dos usuários pela utilização dos sistemas, à partir do qual foram desenvolvidas várias metodologias para a realização dos levantamentos. Estas novas metodologias passaram a atender as necessidades de precisão de vários tipos de atividades, inclusive as geodésicas que requerem alta

precisão. Desta forma, os métodos relativos, já empregados no VLBI, passaram a ser utilizados proporcionando a modelagem de diversas fontes de erros presentes nas observações. No fluxograma a seguir destacam-se as principais técnicas de posicionamento.

FIGURA 3.5 – MÉTODOS E TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO



(FONTE: ADAPTADO DE CARVALHO, 1999)

A seguir descreve-se os métodos de posicionamento absoluto e relativo, com o emprego da técnica estático clássico, destacando-se suas aplicações. A descrição se concentrou nesta técnica por esta ter sido aplicada nos levantamentos de campo.

3.4.1 Posicionamento Absoluto

O método de posicionamento absoluto caracteriza-se por empregar apenas um receptor durante a coleta de dados. Seu princípio fundamental é baseado na medida de pseudo-distâncias, com o emprego dos códigos ou das portadoras. Os modelos matemáticos utilizados neste método são descritos pelas expressões (3.3) para observações com os códigos ou (3.5) para observações com a fase da portadora. Este tipo de posicionamento tem principal aplicação na navegação em tempo real e no pré-processamento de dados. Esta é a modalidade de posicionamento primária fornecida pelos receptores, desde os mais simples até os mais sofisticados. As precisões possíveis de serem obtidas são aquelas mencionadas na seção 2.3. O posicionamento absoluto pode ser aplicado tanto nos levantamentos estáticos quanto nos cinemáticos. Pode-se observar a configuração geométrica do posicionamento absoluto através da figura 3.1.

3.4.2 Posicionamento Relativo

O método de posicionamento relativo é caracterizado pelo emprego de dois ou mais receptores para a coleta dos dados, sendo que um receptor deve permanecer instalado numa estação com coordenadas conhecidas, denominada de estação de referência. O princípio de medida deste método é baseado na diferença de observações entre a estação de referência e as estações de interesse, nas quais deseja-se determinar as coordenadas. Para tal deve-se realizar observações simultâneas, à partir de todas as estações envolvidas no levantamento. Dentro do contexto de posicionamento relativo existe uma grande variedade de técnicas, podendo-se empregar o código, a fase da portadora ou ainda combinar as duas observáveis.

O método relativo permite a minimização ou eliminação de diversas fontes de erros, mediante a utilização das combinações lineares.

Inseridas no contexto de posicionamento relativo pode-se destacar as técnicas estático clássico, estático rápido, cinemático contínuo, pseudocinemático e *stop and go*.

3.4.2.1 Levantamento estático clássico

O levantamento estático clássico, empregando medidas da fase da portadora, é o método que proporciona a melhor acurácia possível de ser obtida com o GPS ou o GLONASS, com resultados variando entre 1 ppm e 0,1 ppm. Utiliza-se período de rastreo de algumas horas, variável em função do tamanho da linha de base. Neste caso usualmente utiliza-se uma taxa de gravação de dados de 15 segundos, em função do grande período de observação, que pode chegar a algumas horas de acordo com a finalidade do levantamento.

4 LEVANTAMENTOS DE CAMPO E PROGRAMA DE PROCESSAMENTO

Os levantamentos de campo, bem como o processamento dos dados, necessários à realização deste trabalho, foram executados com equipamentos e programas gentilmente cedidos pelas empresas Datum Ltda. e SightGPS.

Durante a realização dos experimentos ocorreram problemas para a execução dos levantamentos, dentre os quais a pouca disponibilidade de tempo e desconhecimento do manuseio dos equipamentos e do programa de processamento utilizados.

As dificuldades encontradas na aquisição dos dados se devem principalmente ao fato de que a integração dos sistemas GPS e GLONASS é uma prática nova no Brasil, existindo poucos receptores disponíveis, tanto no que se refere a representantes para venda quanto de usuários.

A parte experimental do trabalho foi composta por levantamentos contendo os posicionamentos absoluto e relativo.

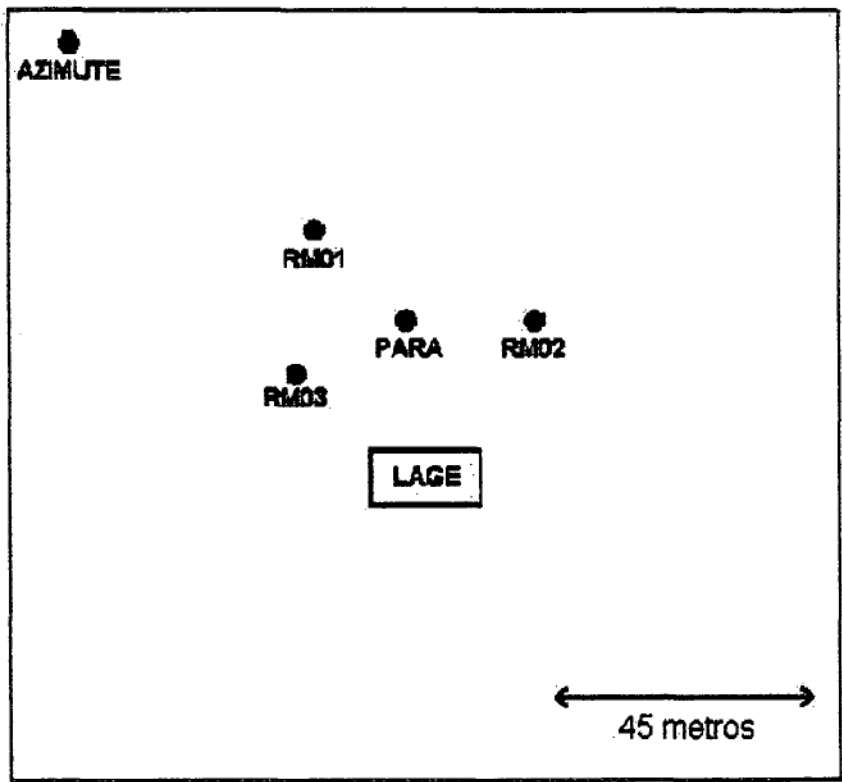
4.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS

A aquisição de dados para os experimentos foi realizada dentro de uma área teste, localizada no Centro Politécnico, pertencente ao Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE) da UFPR, composta por cinco marcos geodésicos denominados de PARA, RM01, RM02, RM03 e AZIMUTE, mostrados esquematicamente na figura 4.1.

Os marcos localizados na área teste possuem coordenadas determinadas de forma precisa, no sistema WGS-84. As estações PARA e RM03 fazem parte da rede SIRGAS, e possuem coordenadas determinadas com precisão final de $\pm 5\text{mm}$, ou seja, com qualidade superior à das demais estações (IBGE, 1998). A estação PARA, além de pertencer à rede SIRGAS também faz parte da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Nesta estação mantém-se uma antena permanentemente instalada, com o objetivo de rastrear satélites do sistema GPS, fato que impossibilitou sua utilização como estação base, no caso de levantamento GPS/GLONASS. Desta forma, considerando a qualidade de suas coordenadas, a estação RM03, foi utilizada como base durante a realização dos levantamentos,

tanto no posicionamento absoluto quanto no relativo. As coordenadas das estações da área teste estão indicadas na tabela 4.1.

FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS NOS LEVANTAMENTOS



(FONTE: ADAPTADO DE CARVALHO, 1998)

TABELA 4.1 – COORDENADAS (WGS-84) DAS ESTAÇÕES LOCALIZADAS NA ÁREA TESTE

ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
PARA	25° 26' 54,1291" S	49° 13' 51,4368" W	925,759 m
RM01	25° 26' 53,3260" S	49° 13' 51,3428" W	925,230 m
RM02	25° 26' 54,5442" S	49° 13' 50,6477" W	924,445 m
RM03	25° 26' 54,5685" S	49° 13' 52,2108" W	923,785 m
AZIMUTE	25° 26' 48,1297" S	49° 13' 53,9934" W	928,390 m

4.2 POSICIONAMENTO ABSOLUTO

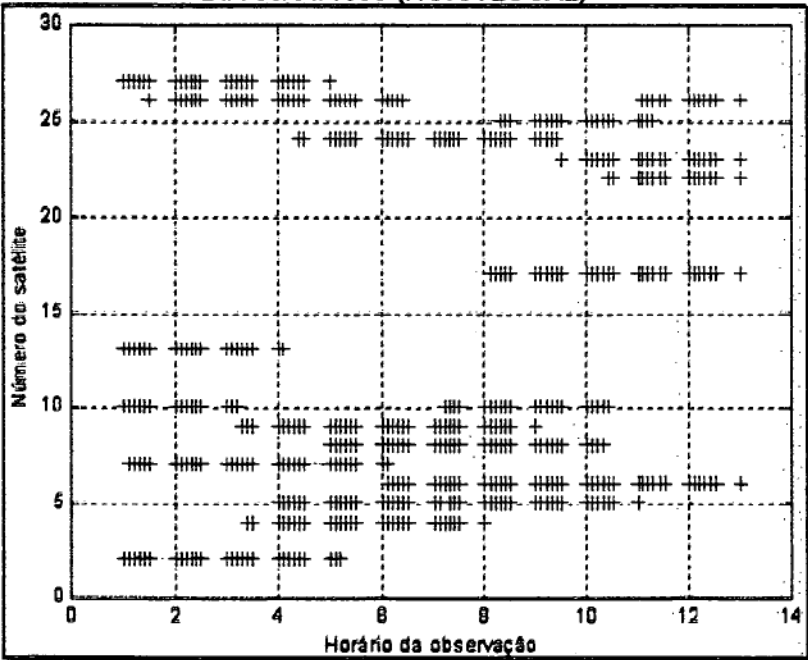
A aquisição de dados para o posicionamento absoluto foi realizada durante os meses de janeiro e fevereiro de 1999, dentro de uma breve participação na Campanha IGEX (*International GLONASS Experiment*). Para tal manteve-se um receptor permanentemente instalado no marco geodésico RM03, durante 29 dias

consecutivos, com o objetivo de obter arquivos de rastreo com 24 horas de duração. A participação na campanha IGEX não foi consumada devido à problemas (por exemplo arquivo muito extenso), não sendo possível gerar os arquivos de 24 horas. Desta forma, do posicionamento absoluto obteve-se 32 arquivos de dados com 12 horas de duração, empregando-se taxa de gravação de dados de 30 segundos, o que proporcionou 1440 épocas de rastreo para cada arquivo de 12 horas.

Durante a aquisição dos dados pode-se observar grande variação na disponibilidade de satélites GLONASS, com quantidades variando entre 1 e 5 satélites rastreados. Esta situação foi provocada devido ao fato da constelação do sistema estar incompleta. Visando evidenciar esta situação mostra-se, respectivamente, nos gráficos 4.1 e 4.2 a variação na quantidade de satélites GPS e GLONASS, para um arquivo de dados de 12 horas, obtido no dia 30/01/1999.

No gráfico 4.1 observa-se uma disponibilidade de no mínimo 4 satélites no sistema GPS, o que proporciona a obtenção do posicionamento tridimensional em qualquer horário do dia.

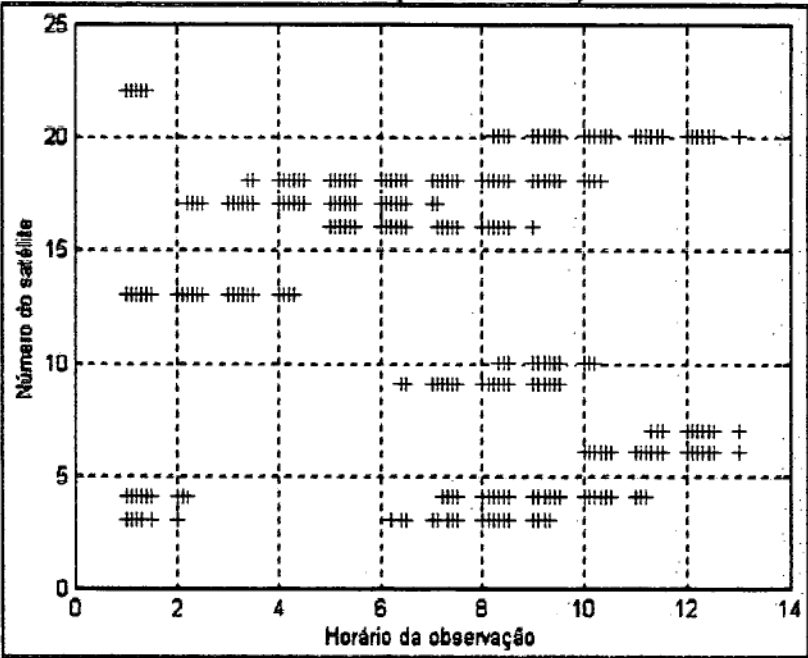
GRÁFICO 4.1 – DISPONIBILIDADE DE SATÉLITES GPS NO DIA 30/01/1999 (HORA LOCAL)



No gráfico 4.2 mostra-se a disponibilidade de satélites GLONASS. Neste caso constata-se que ocorreram períodos em que não se dispunha do mínimo de 4 satélites, necessários ao posicionamento tridimensional. Como exemplo pode-se

destacar o trecho compreendido entre 12 e 13 horas, no qual tem-se apenas 3 satélites disponíveis para rastreo.

GRÁFICO 4.2 – DISPONIBILIDADE DE SATÉLITES GLONASS NO DIA 30/01/1999 (HORA LOCAL)



4.3 POSICIONAMENTO RELATIVO

A aquisição de dados para o posicionamento relativo foi desempenhada em junho de 2000. Realizou-se o posicionamento das estações RM01 e RM02, empregando o método relativo, adotando como referência a estação RM03. Para tal foi empregada uma taxa de gravação de dados 15 segundos, e um período de rastreo de duas horas, obtendo-se aproximadamente 500 épocas de rastreo em cada arquivo de dados. As duas linhas de base obtidas, RM03-RM01 e RM03-RM02, tem aproximadamente 40 metros de extensão.

Apesar do intervalo de 17 meses decorrido entre os posicionamentos absoluto e relativo, a situação da constelação GLONASS continuou precária, ocorrendo momentos em que não foi possível realizar o posicionamento tridimensional. Durante o intervalo entre os dois levantamentos houveram lançamentos de novos satélites, enquanto que outros satélites saíram de operação. Para ilustrar as modificações na constelação do sistema GLONASS mostra-se nas tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 o seu *status*, em três datas distintas. No dia 6 de maio de 2000

pode-se observar a existência de 9 satélites disponíveis na constelação, em contrapartida a 6 satélites no dia 30 de agosto de 2000 e 10 satélites em 9 de janeiro de 2001.

TABELA 4.2 – STATUS DA CONSTELAÇÃO GLONASS EM 6 DE MAIO DE 2000

Número GLONASS	Número Cosmos	Plano/ Posição	Canal de Freqüência	Data de Lançamento	Data de início de Operação	Status	Data do Final de Operação
775	2289	2/16	22	11/08/94	07/09/94	Operacional	
766	2308	3/22	10	07/03/95	05/04/95	Operacional	
781	2317	2/10	9	24/07/95	22/08/95	Operacional	
785	2318	2/11	4	24/07/95	22/08/95	Operacional	
776	2323	2/9	6	14/12/95	07/01/96	Não operacional	05/05/00
778	2324	2/15	11	14/12/95	26/04/99	Operacional	
782	2325	2/13	6	14/12/95	18/01/96	Operacional	
779	2364	1/1	2	30/12/98	18/02/99	Operacional	
784	2363	1/8	8	30/12/98	29/01/99	Operacional	
786	2362	1/7	7	30/12/98	29/01/99	Operacional	

TABELA 4.3 – STATUS DA CONSTELAÇÃO GLONASS EM 30 DE AGOSTO DE 2000

Número GLONASS	Número Cosmos	Plano/ Posição	Canal de Freqüência	Data de Lançamento	Data de início de Operação	Status	Data do Final de Operação
775	2289	2/16	22	11/08/94	07/09/94	Não operacional	13/08/00
766	2308	3/22	10	07/03/95	05/04/95	Não operacional	29/08/00
781	2317	2/10	9	24/07/95	22/08/95	Operacional	
785	2318	2/11	4	24/07/95	22/08/95	Não operacional	13/08/00
776	2323	2/9	6	14/12/95	07/01/96	Não operacional	13/08/00
778	2324	2/15	11	14/12/95	26/04/99	Operacional	
782	2325	2/13	6	14/12/95	18/01/96	Operacional	
779	2364	1/1	2	30/12/98	18/02/99	Operacional	
784	2363	1/8	8	30/12/98	29/01/99	Operacional	
786	2362	1/7	7	30/12/98	29/01/99	Operacional	

TABELA 4.4 – STATUS DA CONSTELAÇÃO GLONASS EM 9 DE JANEIRO DE 2001

Número GLONASS	Número Cosmos	Plano/ Posição	Canal de Freqüência	Data de Lançamento	Data de início de Operação	Status	Data do Final de Operação
766	2308	3/22	10	07/03/95	05/04/95	Não operacional	21/11/00
781	2317	2/10	9	24/07/95	22/08/95	Operacional	
785	2318	2/11	4	24/07/95	22/08/95	Operacional	
778	2324	2/15	11	14/12/95	26/04/99	Operacional	
782	2325	2/13	6	14/12/95	18/01/96	Operacional	
779	2364	1/1	2	30/12/98	18/02/99	Operacional	
784	2363	1/8	8	30/12/98	29/01/99	Operacional	
786	2362	1/7	7	30/12/98	29/01/99	Operacional	
783	2374	3/18	10	13/10/00	05/01/01	Operacional	
787	2375	3/17	5	13/10/00	04/11/00	Operacional	
788	2376	3/24	3	13/10/00	21/11/00	Operacional	

4.4 CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS EMPREGADOS

Os equipamentos utilizados nos posicionamentos absoluto e relativo são da marca JPS (*JAVAD Positioning Systems*), atualmente TOPCON-JAVAD, a qual possui diversos equipamentos, capazes de receber sinais dos sistemas GPS e GLONASS.

O equipamento utilizado nestes levantamentos, descritos nas seções 4.2 e 4.3, é composto pelo conjunto receptor Legacy e antena Legant, capaz de receber sinais dos códigos e das portadoras dos sistemas GPS e GLONASS. As características deste equipamento estão indicadas na tabela 4.5.

TABELA 4.5 – CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO EMPREGADO

Especificações de rastreio Canais para rastreio Sinais rastreados	40 canais L1, 20 canais L1+L2 GPS/GLONASS (opcional) Códigos C/A e P, Portadoras L1 e L2
Especificações de Desempenho Acurácia para linhas de base Inicialização sem efemérides Inicialização com efemérides Reaquisição	1mm+1ppm p/ 2 frequências, 2mm+2ppm p/ 1 frequência < 60 segundos < 10 segundos < 1 segundo
Especificações Físicas Dimensões (cm) Peso (kg)	2,5 X 22,5 X 3,5 0,7
Especificações de Energia Bateria Entrada de energia Consumo	Externa 6 a 28 Volts Corrente Contínua 3,0 Watt
Especificações do Ambiente Embalagem Temperatura de armazenamento Temperatura de operação	à prova d'água, feita de material de alta tecnologia, mecanicamente mais estável do que o alumínio -30°C a + 75°C -20°C a + 55°C
Especificações da Antena GPS Antena GPS Tipo da antena Plano de terra	Externa Microstrip (Centro de Fase Zero) Plano de terra baixo ou choke ring
Especificações do Rádio Modem de radio SpSp Tipo Alcance Antena de radio SpSp Tipo de antena Antena externa SpSp Modem de radio UHF Alcance	Interna curta frequência e propagação do espectro 1 km sem amplificador, 15 km com amplificador de um Watt externa Whip ou AntPole Whip ou AntPole Externa 45 km com amplificador de 35 Watt
I/O	

Portas de comunicação	Quatro portas seriais(RS232), 1 porta paralela de alta velocidade (1Mbyte/s)
Indicador do status	2 LED's para 3 cores, duas teclas de funções
Memória & Armazenamento	
Memória interna	até 80 Mbytes
Armazenamento de dados brutos	até 20 épocas por segundo
Tipo de dados	código e portadoras L1 e L2 do GPS e do GLONASS
Saída de Dados	
Formato de dados p/ tempo real	RTCM 104 versão 2.2, mensagens 1,2,3,6,9,16,18,19,31,32,34,36
Saída ASCII	NMEA 0183 versão 2.20
Outras saídas	Formato JPS
Velocidade de saída	Até 20 épocas por segundo
Características da Antena	
Diâmetro (cm)	22,5
Altura (cm)	3,5
Peso (kg)	0,86
Temperatura de armazenamento	-50°C a +75°C
Temperatura de operação	-40°C a +55°C

Nas figuras 4.2 e 4.3 mostram-se respectivamente a antena e o receptor, empregados nos levantamentos. Pode-se observar na figura 4.3 que o receptor Legacy possui apenas dois botões para a execução dos comandos. Uma característica importante deste receptor é o fato da seleção das características do rastreo ser realizada por um programa dedicado, seguindo-se as etapas convencionais, tais como: seleção do nome da estação; taxa de gravação de dados; ângulo de máscara; inserção da altura da antena; dentre outros parâmetros. Após a seleção das características do rastreo, descarrega-se as informações na memória do receptor, possibilitando então o início do levantamento. Se for desejada a alteração das características do rastreo, durante a realização dos experimentos, deve-se levar a campo um computador de modo que possam ser feitas as alterações necessárias.

FIGURA 4.2 – ANTENA JPS LEGANT

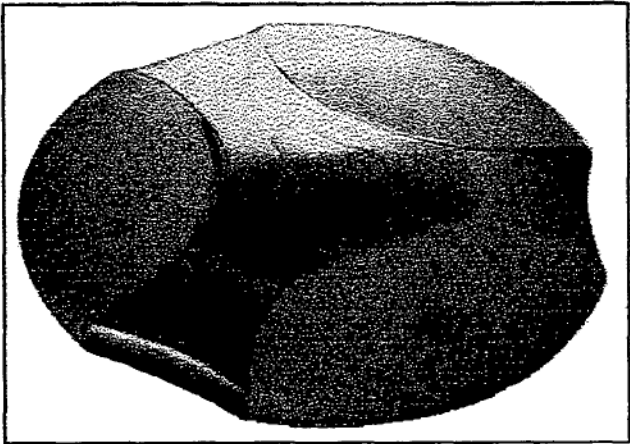
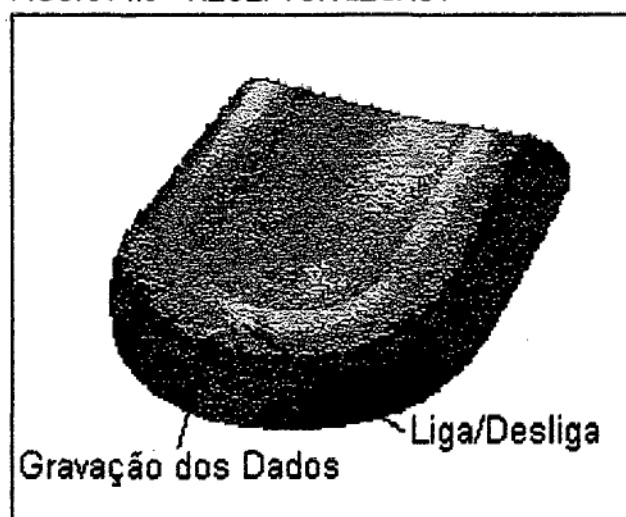


FIGURA 4.3 – RECEPTOR LEGACY



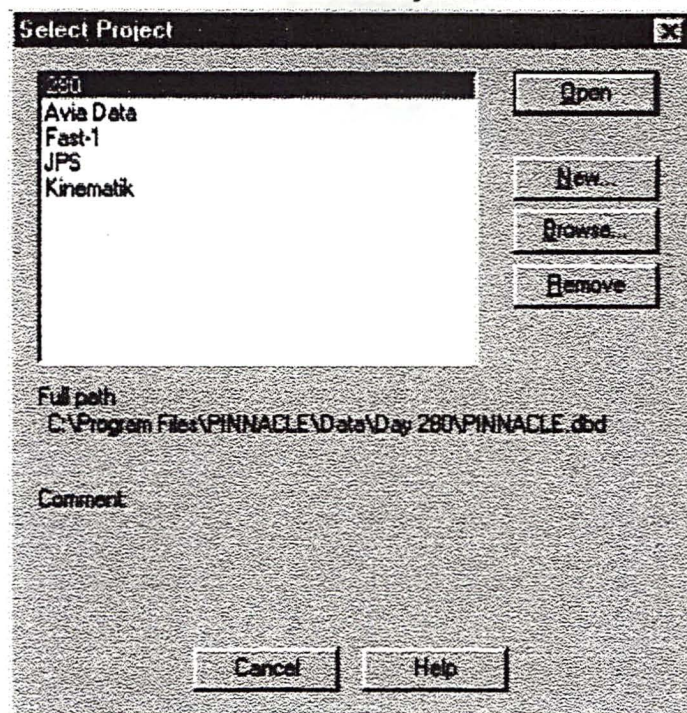
4.5 PROGRAMA DE PROCESSAMENTO

Para processar os dados coletados nos levantamentos utilizou-se o programa *Pinnacle*, o qual possibilita o processamento de dados GPS, GLONASS e GPS/GLONASS. Para realizar os processamentos neste programa deve-se criar pastas (diretórios), denominadas de projetos, onde são armazenadas todas as informações relativas a um processamento específico. Nos itens a seguir são descritas as principais etapas necessárias para realizar um processamento, exemplificadas através de figuras.

4.5.1 Como Criar ou Selecionar um Projeto

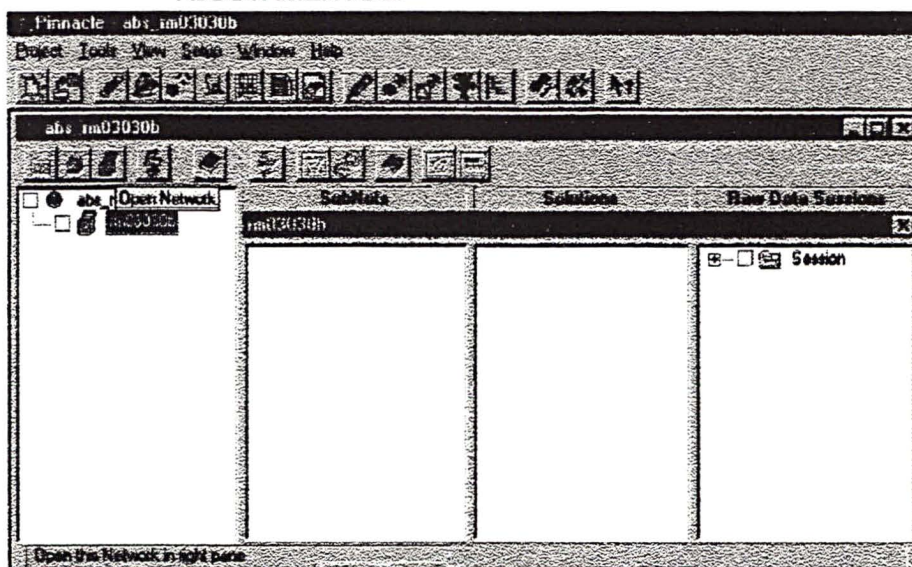
Ao inicializar o programa em um computador uma caixa de diálogo ou janela (figura 4.4) é aberta, permitindo a seleção de projetos já realizados ou a criação de novos projetos. Nesta caixa de diálogo pode-se executar uma das seguintes operações: abrir um processamento preexistente, criar um novo processamento, procurar um processamento que esteja localizado em outro diretório e remover processamentos existentes no diretório corrente.

FIGURA 4.4 – JANELA DE SELEÇÃO DE PROJETOS



Após abrir um projeto preexistente ou criar um novo projeto, tem-se acesso a uma caixa de diálogo, conforme ilustrado na figura 4.5. Nela são descarregados os dados brutos e indicadas as soluções e os ajustamentos.

FIGURA 4.5 – JANELA DE DADOS BRUTOS, SOLUÇÕES E AJUSTAMENTOS.



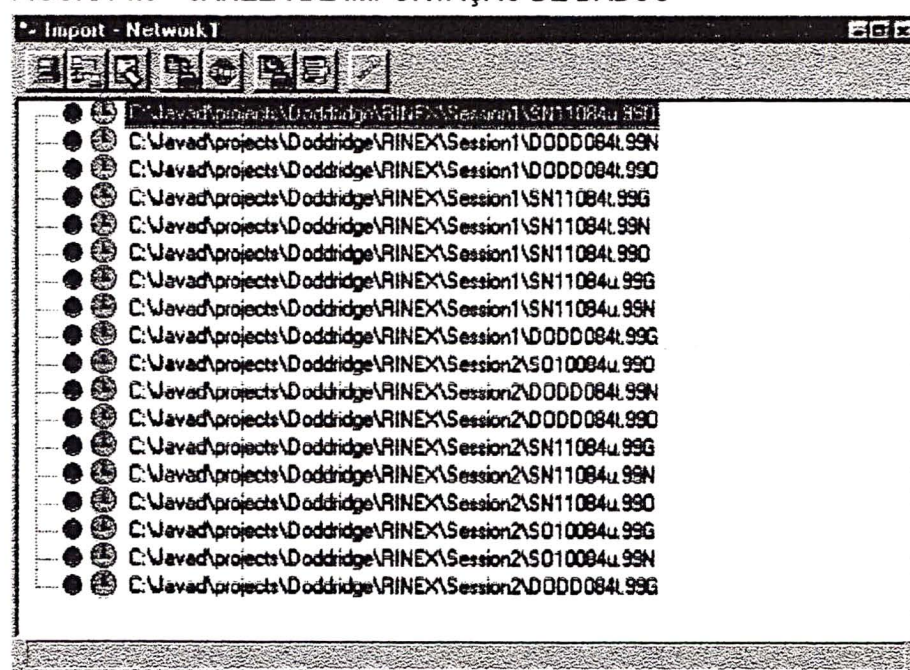
4.5.2 Importação de Dados

Após criar um projeto deve-se selecionar os dados a serem processados. Esta seleção é feita à partir da opção de importação, ativada através do botão direito do *mouse*. Quando a janela de importação está ativada, abre-se uma caixa de diálogo. Nela deve-se procurar o diretório onde os dados de rastreo estão armazenados. No *Pinnacle* é possível importar dados com as seguintes extensões:

- provenientes dos receptores JAVAD;
- RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*);
- provenientes dos receptores ASHTECH.

Na figura 4.6 mostra-se, por exemplo, a janela de importação de dados, com a importação de dados GPS/GLONASS no formato RINEX. A nomenclatura utilizada neste caso é: "O" para dados de observação GPS e GLONASS; "G" para dados de navegação GLONASS e "N" para dados de navegação GPS.

FIGURA 4.6 – JANELA DE IMPORTAÇÃO DE DADOS



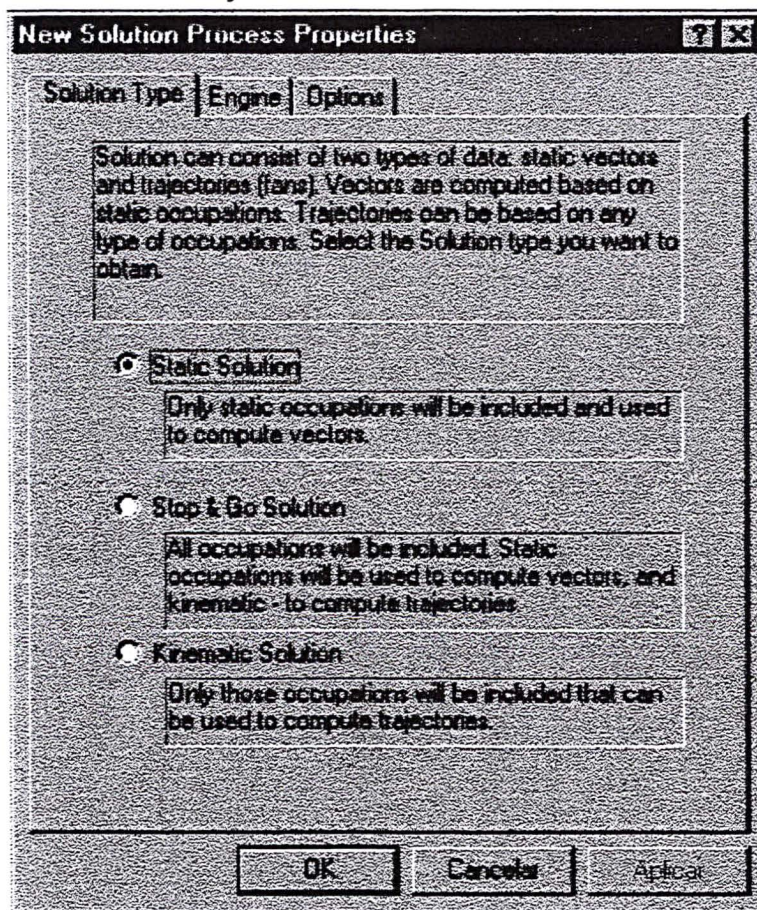
4.5.3 Processamento dos Dados

O *Pinnacle* permite a realização de processamento de dados de posicionamentos relativo e absoluto, nos métodos estático, cinemático ou intermediários, denominados no programa de *stop and go*.

Quando trabalha-se com posicionamento absoluto obtém-se os resultados finais imediatamente após a importação dos dados de rastreio, não sendo necessário realizar nenhuma etapa adicional.

Quando se realiza posicionamento relativo deve-se optar por uma das opções de processamento oferecidas pelo programa: *Static Solution*, *Stop and Go Solution* ou *Kinematic Solution*. Deve-se selecionar também o processamento de dados GPS, GLONASS ou GPS/GLONASS, bem como o uso das portadoras L1, L2 ou dos códigos. Estas opções são ilustradas na figura 4.7 na qual mostra-se, por exemplo, um processamento realizado através da solução estática.

FIGURA 4.7 – OPÇÕES DE PROCESSAMENTO



Outra opção existente neste processamento é a fixação de estações para serem utilizadas como base. Para tal deve-se informar o nome da estação, suas coordenadas e o sistema de referência utilizado. Esta opção é denominada no programa de *control point* e pode ser ativada através da janela principal do programa, através do botão direito do *mouse*. Na figura 4.8 observa-se esta janela ativada tendo-se como base o marco RM03 (mostrado na figura 4.1), com suas coordenadas e sistema de referência utilizado.

FIGURA 4.8 – FIXANDO UMA ESTAÇÃO COMO REFERÊNCIA

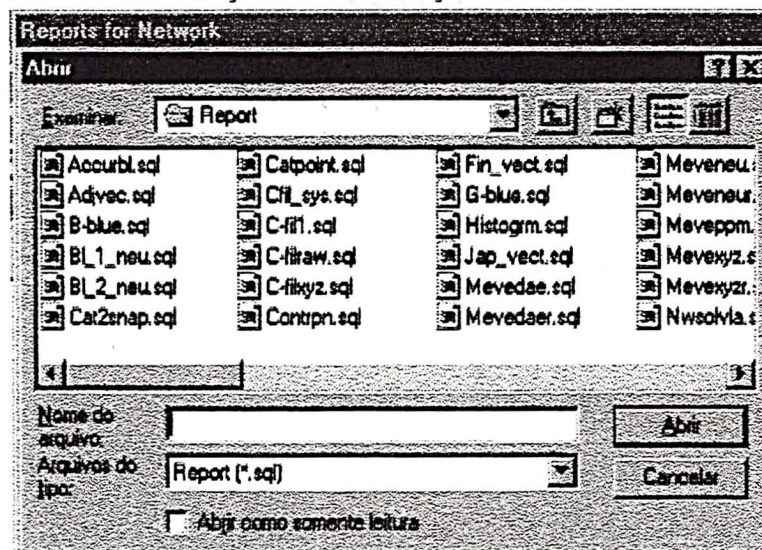
The screenshot shows a dialog box titled "Properties for Item of control point RM03". It has two tabs: "General" and "Data source". The "General" tab is selected. The dialog contains the following fields and options:

- Latitude:** Radio buttons for N and S. S is selected. Fields for degrees (25), minutes (26), and seconds (54.5685).
- Longitude:** Radio buttons for E and W. W is selected. Fields for degrees (49), minutes (13), and seconds (52.2108).
- Height, m:** Text field containing 923.705.
- Height Type:** Radio buttons for Ellipsoidal and Orthometric. Ellipsoidal is selected.
- System/Datum:** Dropdown menu showing WGS84.
- Signal(Latitude):** Text field containing 0.
- Signal(Longitude):** Text field containing 0.
- Signal(Height):** Text field containing 0.
- Height system:** Dropdown menu.
- Comment:** Large empty text area on the right.
- Buttons:** OK, Cancel, and Help at the bottom.

4.5.5 Geração dos Relatórios dos Processamentos

Após a realização dos processamentos é necessário gerar os relatórios, onde pode-se visualizar os resultados obtidos. As opções dos relatórios são disponibilizadas em função do tipo de solução obtida, podendo-se gerar 3 relatórios distintos: para dados somente importados (posicionamento absoluto), para dados processados (posicionamento relativo) e para dados ajustados (quando se dispõe de três ou mais estações). Na figura 4.9 observa-se a janela de relatórios ativada.

FIGURA 4.9 – OPÇÕES DE GERAÇÃO DE RELATÓRIOS



Nas tabelas 4.6 e 4.7 mostra-se algumas das opções de relatórios disponíveis no programa *Pinnacle*. O arquivo de relatório “C-filraw”, composto pelas coordenadas instantâneas obtidas de rastreo, pode ser observado na tabela 4.6. Nesta tabela tem-se as seguintes informações: “site”, indicando o nome da estação de rastreo; “MM/DD/YY”, o mês, dia e ano da observação; “HH:MM:SS”, hora, minuto e segundo da observação; “SVs”, quantidade de satélites rastreados; “PDOP”, fator numérico representando a geometria dos satélites; coordenadas latitude, longitude e altitude da estação rastreada e “RMS”, erro médio quadrático das observações (dado em metros).

TABELA 4.6 – COORDENADAS INSTANTÂNEAS OBTIDAS DO PROCESSAMENTO

SITE	MM/DD/YY	HH:MM:SS	SVs	PDOP	LATITUDE	LONGITUDE	HI (m)	RMS (m)
rm03	01/30/99	01:00:00.00	11	1.1	S 25.44835685	W 49.23113459	897.8389	41.320
rm03	01/30/99	01:00:30.00	12	0.9	S 25.44841721	W 49.23116870	909.4135	41.320
rm03	01/30/99	01:01:00.00	11	1.0	S 25.44859220	W 49.23116812	892.4601	41.320
rm03	01/30/99	01:01:30.00	11	1.1	S 25.44842430	W 49.23115515	890.7671	41.320
rm03	01/30/99	01:02:00.00	12	0.9	S 25.44842335	W 49.23120942	912.9764	41.320
rm03	01/30/99	01:02:30.00	11	1.0	S 25.44858725	W 49.23116950	900.4587	41.320
rm03	01/30/99	01:03:00.00	12	0.9	S 25.44841703	W 49.23120874	924.1863	41.320
rm03	01/30/99	01:03:30.00	12	0.9	S 25.44848274	W 49.23121550	917.6300	41.320
rm03	01/30/99	01:04:00.00	12	0.9	S 25.44851043	W 49.23119989	913.0918	41.320
rm03	01/30/99	01:04:30.00	12	0.9	S 25.44843597	W 49.23122530	918.9445	41.320
rm03	01/30/99	01:05:00.00	12	0.9	S 25.44846233	W 49.23121182	918.0346	41.320
rm03	01/30/99	01:05:30.00	11	1.1	S 25.44838068	W 49.23113171	879.0367	41.320
rm03	01/30/99	01:06:00.00	12	0.9	S 25.44846180	W 49.23119885	891.9274	41.320
rm03	01/30/99	01:06:30.00	12	0.9	S 25.44844395	W 49.23119838	890.3262	41.320
rm03	01/30/99	01:07:00.00	12	0.9	S 25.44844697	W 49.23117951	896.9506	41.320
rm03	01/30/99	01:07:30.00	12	0.9	S 25.44844883	W 49.23118657	889.9756	41.320
rm03	01/30/99	01:08:00.00	12	0.9	S 25.44846500	W 49.23117579	893.5035	41.320
rm03	01/30/99	01:08:30.00	12	0.9	S 25.44844879	W 49.23118981	895.0206	41.320
rm03	01/30/99	01:09:00.00	12	0.9	S 25.44841846	W 49.23116874	895.7099	41.320

Na tabela 4.7 mostra-se o arquivo de relatório “Ptlist”, composto pelas coordenadas finais de um processamento absoluto da estação RM03.

TABELA 4.7 – COORDENADAS FINAIS OBTIDAS DE PROCESSAMENTO

Point List in WGS84(BLH)					
#	Point Name	Comment	Coordinates		Height (m)
			Latitude	Longitude	
1	rm03030b		25°26'54.52925"S	49°13'52.49158"W	927.1650

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Mediante a aquisição dos dados dos posicionamentos absoluto e relativo, descritos nas seções 4.2 e 4.3, e a realização dos seus respectivos processamentos, procedeu-se a análise de desempenho dos sistemas GPS e GLONASS. A análise de resultados é mostrada nas seções a seguir, mediante a apresentação de gráficos de dispersão, gerados à partir do processamento de dados GLONASS, GPS e GPS/GLONASS.

5.1 ANÁLISE DO POSICIONAMENTO ABSOLUTO

Nos levantamentos empregando o método absoluto a antena do receptor foi instalada sobre uma estação de coordenadas conhecidas, com o intuito de efetuar comparações entre as coordenadas obtidas no rastreo e as da estação base, consideradas como corretas. A estação base adotada é a RM03, a qual possui coordenadas determinadas no sistema SIRGAS (IBGE, 1998). A análise do posicionamento absoluto foi baseada na comparação de coordenadas, ilustradas através de gráficos e tabelas, gerados à partir de dados GPS, GLONASS e GPS/GLONASS.

O posicionamento absoluto foi realizado durante os meses de janeiro e fevereiro de 1999, dentro de uma breve participação na campanha IGEX, conforme descrito na seção 4.2. Desta campanha obteve-se vários arquivos de dados compostos por 12 horas de rastreo aos sistemas GPS e GLONASS, com taxa de gravação de dados de 30 segundos. Em função do longo período de duração dos levantamentos foi possível observar variações na geometria e na quantidade de satélites rastreados, principalmente no que se refere ao sistema GLONASS.

Na análise deste processamento foram empregados dois conjuntos de dados distintos: contendo apenas um dos arquivos de dados de 12 horas, denominado de RM03030b e englobando todos os arquivos de dados de 12 horas obtidos.

5.1.1 Posicionamento Absoluto contendo um arquivo de dados de 12 horas

Os resultados obtidos do processamento do arquivo de 12 horas são compostos por 1440 épocas de dados, o que proporcionou a obtenção de 1440 posições discretas. Visando comparar o desempenho do posicionamento dos sistemas GPS e GLONASS foram realizados processamentos independentes, gerando resultados à partir de dados GPS, GLONASS e GPS/GLONASS.

Os arquivos de resultados obtidos são compostos por coordenadas geodésicas (ϕ , λ , h). Com o intuito de obter valores métricos em latitude e longitude, calculou-se o valor do raio médio da Terra, no ponto considerado, utilizando-se a equação (5.1).

$$R = \sqrt{MN} \quad (5.1)$$

onde:

R é o raio médio de curvatura da Terra;

M é o raio de curvatura da seção meridiana;

N é o raio de curvatura da seção normal;

Após obter as variações métricas em latitude e longitude, obteve-se diferenças entre as coordenadas instantâneas (obtidas do rastreo) e as de referência, gerando-se gráficos de diferenças nas componentes ϕ , λ e H em função das épocas de rastreo. Calculou-se também os erros bidimensionais e tridimensionais obtidos para cada época de rastreo.

Nos gráficos 5.1 e 5.2 indica-se, respectivamente, os erros bidimensional e tridimensional, calculados à partir dos resultados gerados com o processamento conjunto de dados GPS e GLONASS. No gráfico 5.1 observou-se que a variação do erro bidimensional apresentou dispersão menor do que 30 metros na maior parte das épocas de rastreo. Verifica-se também alguns picos com maiores variações, como ocorre por exemplo nas épocas 182 e 1346, onde os erros bidimensionais cometidos foram de 76,69 metros e 81,06 metros, respectivamente.

GRÁFICO 5.1 - ERRO BIDIMENSIONAL OBTIDO NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO COM DADOS GPS/GLONASS

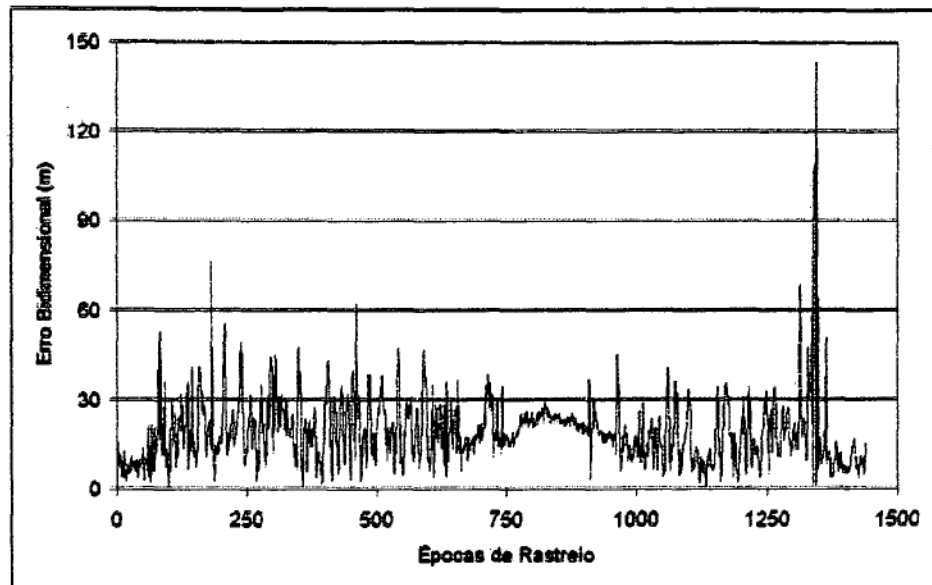
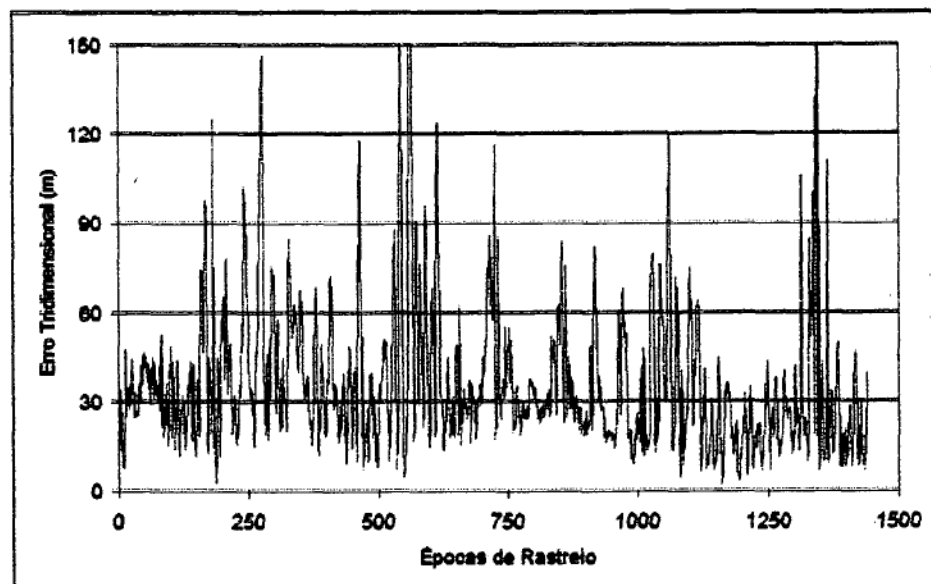


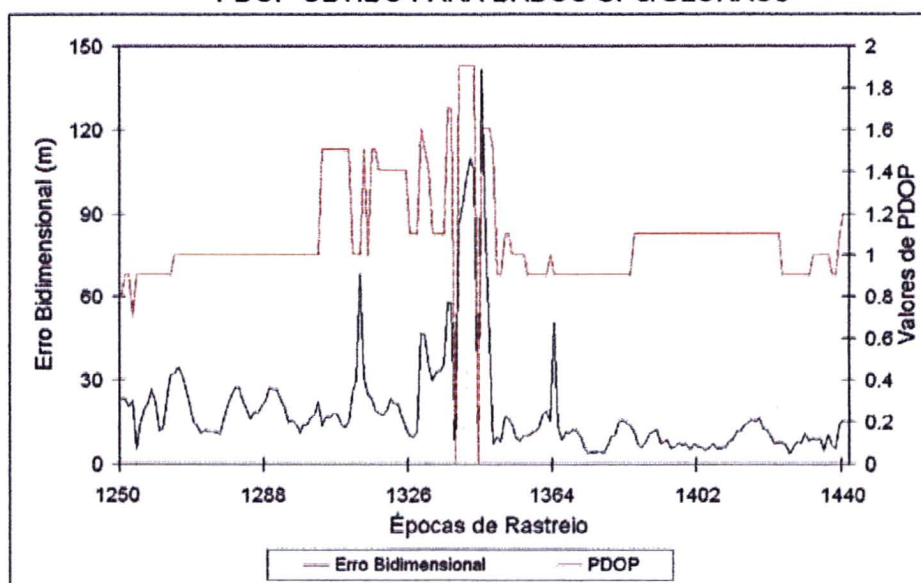
GRÁFICO 5.2 - ERRO TRIDIMENSIONAL OBTIDO NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO COM DADOS GPS/ GLONASS



No caso dos erros tridimensionais observa-se variações inferiores a 60 metros na maior parte do levantamento, ocorrendo também a presença de alguns picos com valores superiores. O comportamento apresentado pode ser atribuído à grande quantidade de satélites disponíveis, quando se emprega a combinação de observações GPS e GLONASS. Os picos observados podem ser atribuídos à presença de épocas em que ocorre distribuição geométrica dos satélites

inadequada. No gráfico 5.3 percebe-se esta situação, no qual evidencia-se um trecho do arquivo de resultados onde ocorre a presença de valores discrepantes, localizado, por exemplo, entre as épocas 1250 e 1441. Apresenta-se neste gráfico a variação do erro bidimensional e do PDOP, em função das épocas de rastreo.

GRÁFICO 5.3 - VARIAÇÃO DO ERRO BIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO PDOP OBTIDO PARA DADOS GPS/GLONASS



No gráfico 5.3 observa-se situações críticas do posicionamento onde ocorrem erros tridimensionais com valores excessivos, como ocorre por exemplo na época 1305, onde tal erro atingiu o valor de 60,12 metros. Observa-se também que para valores baixos de PDOP, entre o intervalo de 0,9 a 1,1, obtém-se erros bidimensionais inferiores a 30 metros.

Para melhor quantificar a amplitude dos erros cometidos no posicionamento GPS/GLONASS, mostra-se a seguir gráficos de porcentagem, separando-se os tais erros em 5 intervalos de classes distintos: até 30 metros, de 30 a 60 metros, de 60 a 90 metros, de 90 a 120 metros e de 120 a 150 metros. Esta representação foi utilizada para os erros bidimensionais e tridimensionais, ilustrados respectivamente nos gráficos 5.4 e 5.5. No gráfico 5.4 observa-se que 88,40% dos erros cometidos foram inferiores a 30 metros. No caso dos erros tridimensionais, gráfico 5.5, a maior parte dos erros ficou classificada em duas classes, sendo que 49,23% foram inferiores a 30 metros e 37,73% ficaram entre 30 e 60 metros.

GRÁFICO 5.4 – CLASSES DE ERROS BIDIMENSIONAIS PARA DADOS GPS/GLONASS

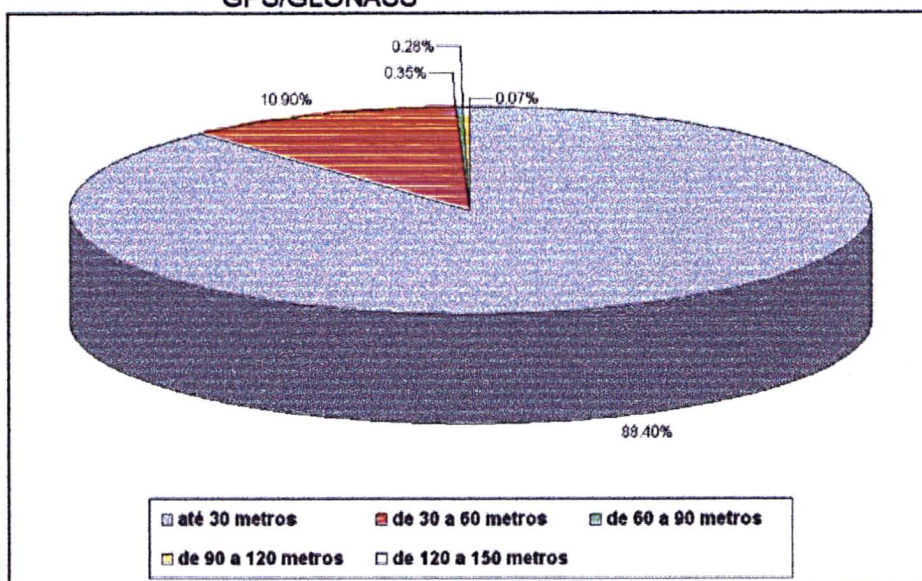
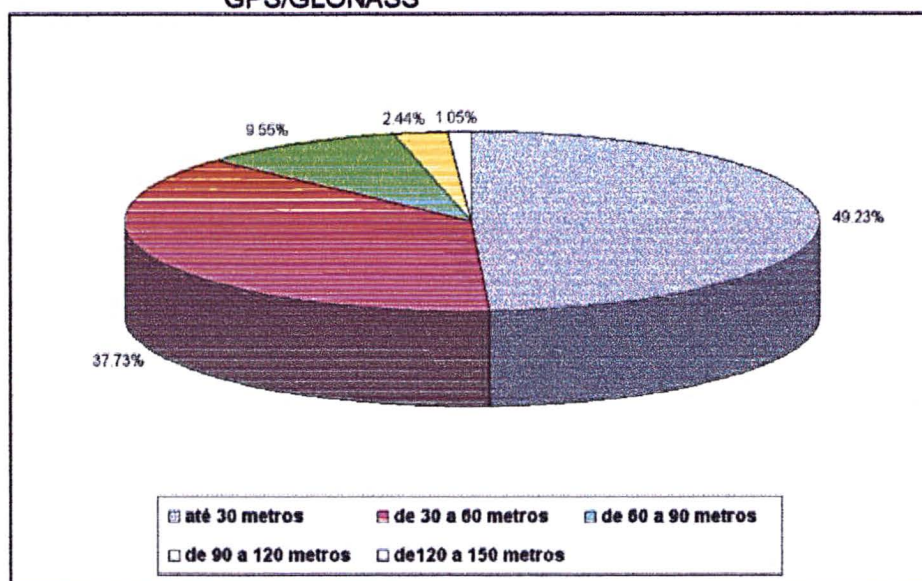


GRÁFICO 5.5 – CLASSES DE ERROS TRIDIMENSIONAIS PARA DADOS GPS/GLONASS



Para visualizar o desempenho do posicionamento absoluto GPS/GLONASS nas componentes φ , λ e H , apresenta-se a seguir os gráficos 5.6, 5.7 e 5.8. Neles observam-se respectivamente as diferenças nas componentes φ , λ e H , em função do PDOP. Comparando-se os três gráficos verifica-se comportamentos semelhantes. Percebe-se que as discrepâncias apresentadas nas componentes φ e λ forma aproximadamente iguais. Na componente H a maior parte dos erros cometidos

apresentaram discrepância inferior a ± 40 metros. Ainda com respeito ao posicionamento absoluto com dados GPS/GLONASS destaca-se que o desvio padrão tridimensional foi de 41,320 metros.

GRÁFICO 5.6 - DIFERENÇAS DE LATITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS/GLONASS

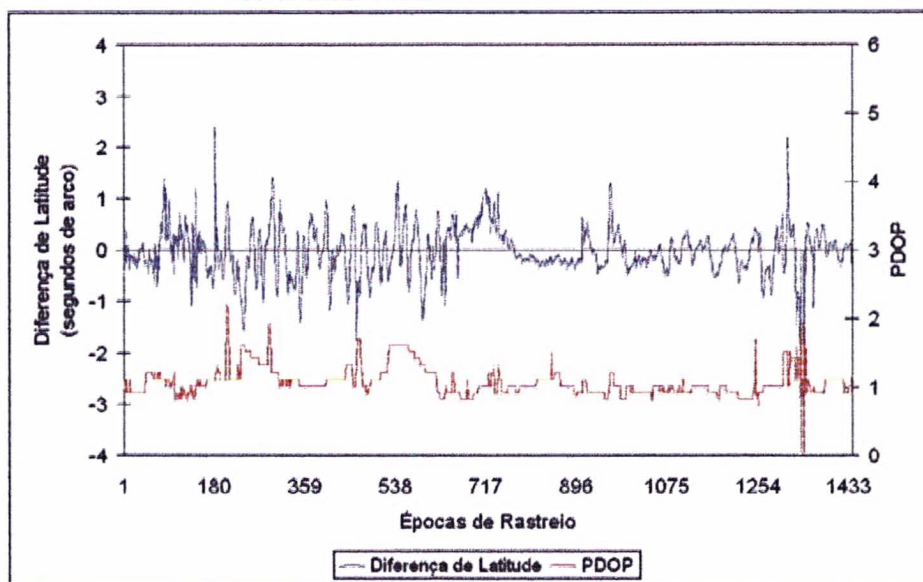


GRÁFICO 5.7 - DIFERENÇAS DE LONGITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS/GLONASS

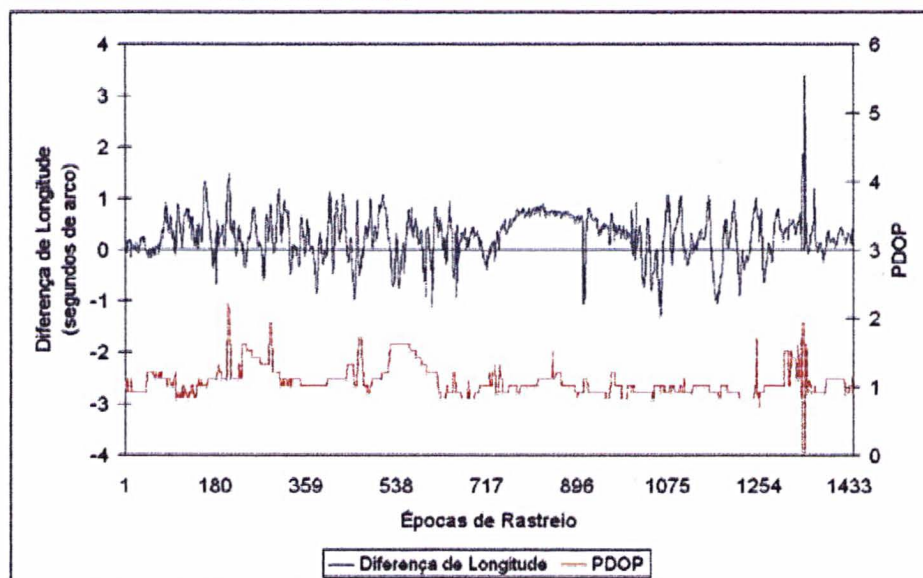
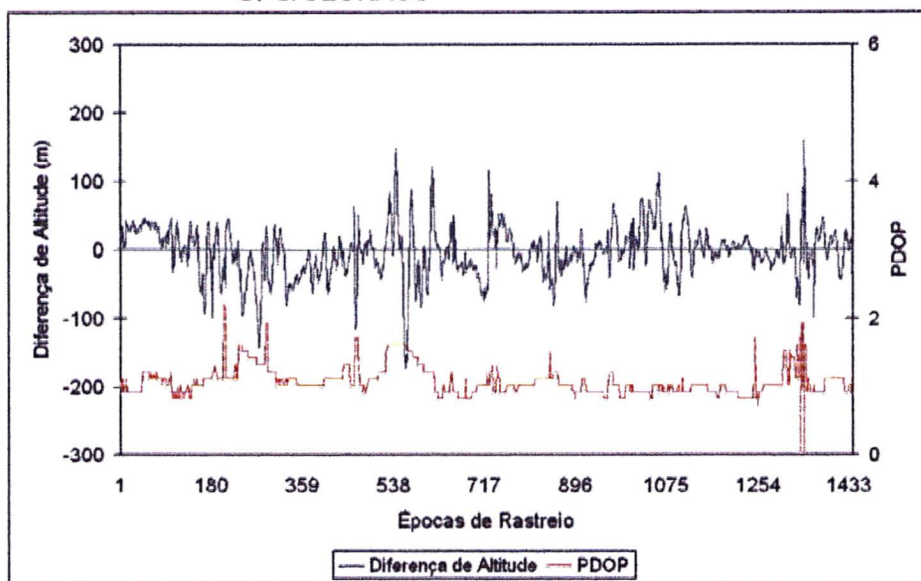


GRÁFICO 5.8 - DIFERENÇAS DE ALTITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS/GLONASS



Nos gráficos 5.9, 5.10 e 5.11 mostra-se, respectivamente, as diferenças das componentes φ , λ e H em relação às coordenadas de referência, obtidas à partir do processamento de dados GLONASS.

GRÁFICO 5.9 - DIFERENÇAS DE LATITUDE OBTIDAS COM DADOS GLONASS

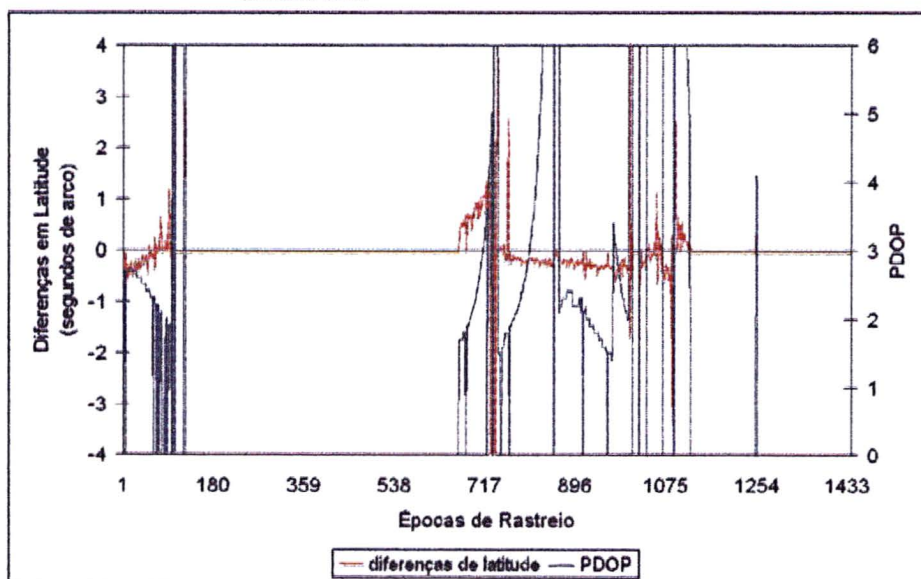


GRÁFICO 5.10 - DIFERENÇAS DE LONGITUDE OBTIDAS COM DADOS GLONASS

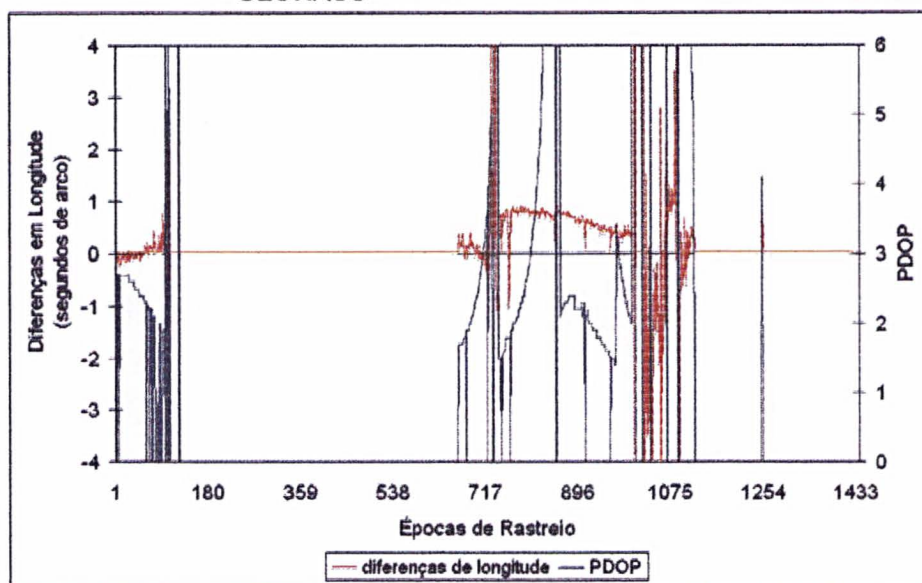
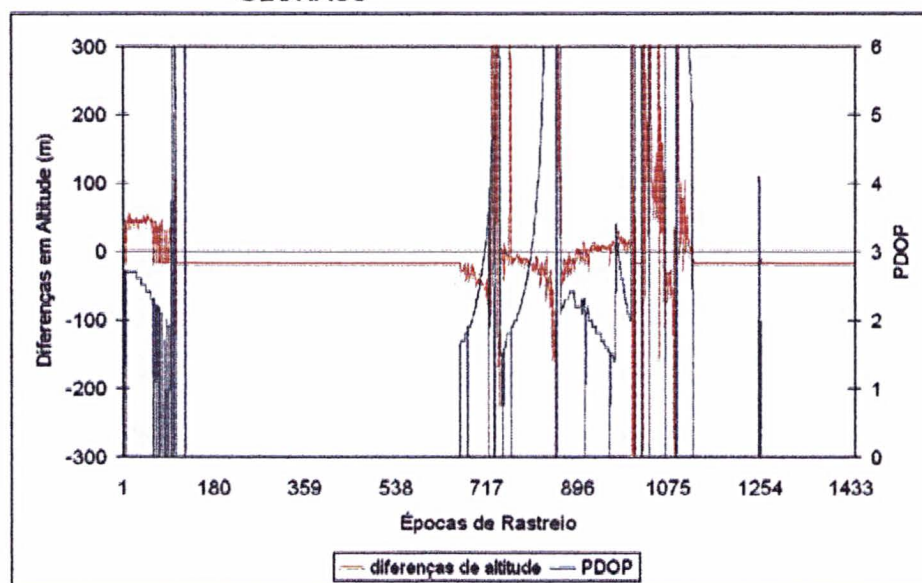


GRÁFICO 5.11 - DIFERENÇAS DE ALTITUDE OBTIDAS COM DADOS GLONASS



Nos gráficos 5.9, 5.10 e 5.11 percebe-se apenas alguns trechos com variações homogêneas, observados no início do arquivo, até aproximadamente a época 120 (trecho A), e no meio do arquivo, entre as épocas 650 e 1100 (trecho B). No trecho B existem vários picos de variação, nos quais ocorrem discrepâncias com valores excessivos, que podem ser explicadas pela falta de disponibilidade de satélites, acarretando em geometria desfavorável para rastreamento.

Para ressaltar esta situação mostra-se na tabela 5.1 um segmento do arquivo de resultados, na qual podem ser observadas as diferenças nas componentes φ , λ e H , o fator PDOP e a quantidade de satélites. Nesta tabela percebe-se a existência de trechos em que o fator PDOP possui valor igual a 0. Isto ocorre quando se dispõe de quantidade insuficiente de satélites para rastreo, situação na qual o programa de processamento sempre fornece o mesmo valor para as coordenadas. Desta maneira as diferenças obtidas nestes casos devem ser desconsideradas. No caso de valores de PDOP superiores a 4 foram obtidos erros excessivos nas componentes φ , λ e H . Algumas destas situações ocorreram mesmo quando se dispunha de dados de mais do que 5 satélites. Isto demonstra que apesar de se dispor de mais satélites do que o necessário, a geometria disponível para os satélites GLONASS não era favorável, em função da sua distribuição nos planos orbitais.

TABELA 5.1 - RESULTADOS DO PROCESSAMENTO COM DADOS GLONASS.

D φ (m)	D λ (m)	DH (m)	Nº de Satélites	PDOP
-1.547	-0.131	-19.183	3	0
-1.547	-0.131	-19.183	4	0
10.234	10.849	-23.663	5	1,6
10.416	7.811	-33.983	5	1,7
15.950	2.338	-29.825	5	1,7
20.941	-3.608	-44.552	5	1,9
18.893	0.808	-42.652	5	1,9
17.834	3.366	-35.336	5	1,9
30.903	-0.070	-57.589	5	3,8
43.687	-13.557	-92.912	5	4,2
-26.792	34.117	193.030	5	4,3
-160.329	115.908	690.371	5	4,5
-15.496	23.821	156.082	5	4,8
-125.322	93.298	536.383	5	5,0
-48.684	48.103	232.598	5	6,3
-242.065	167.884	792.667	5	7,1

No caso do posicionamento com dados GLONASS não foram indicados os gráficos referentes aos erros bidimensional e tridimensional, devido às grandes discrepâncias apresentadas, o que impossibilitou sua análise nas escalas utilizadas anteriormente, dificultando a comparação de resultados com os outros processamentos. Desta forma utilizou-se novamente os gráficos de porcentagem, empregando as mesmas classes de erros adotada no posicionamento

GPS/GLONASS. Desta forma os erros bidimensionais e tridimensionais são apresentados respectivamente nos gráficos 5.12 e 5.13.

GRÁFICO 5.12 – CLASSES DE ERROS BIDIMENSIONAIS PARA DADOS GLONASS

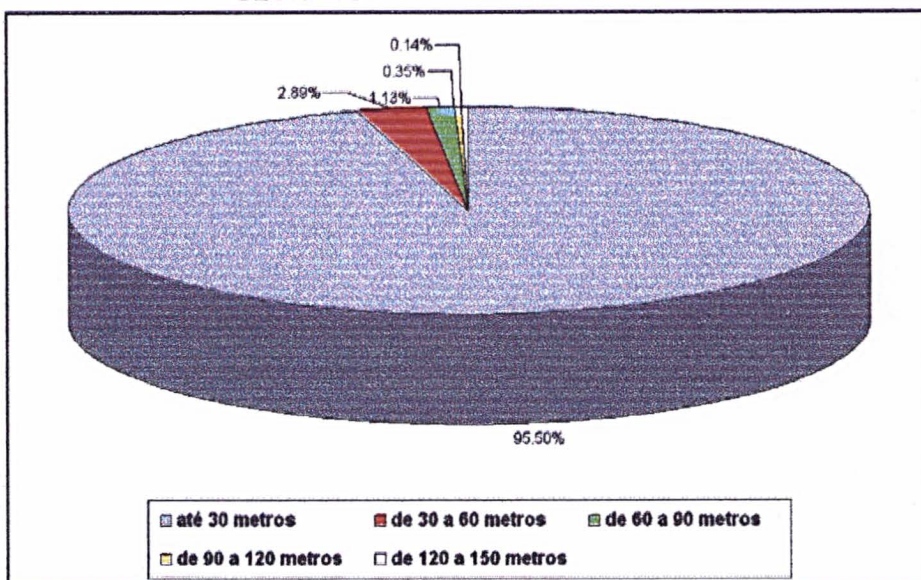
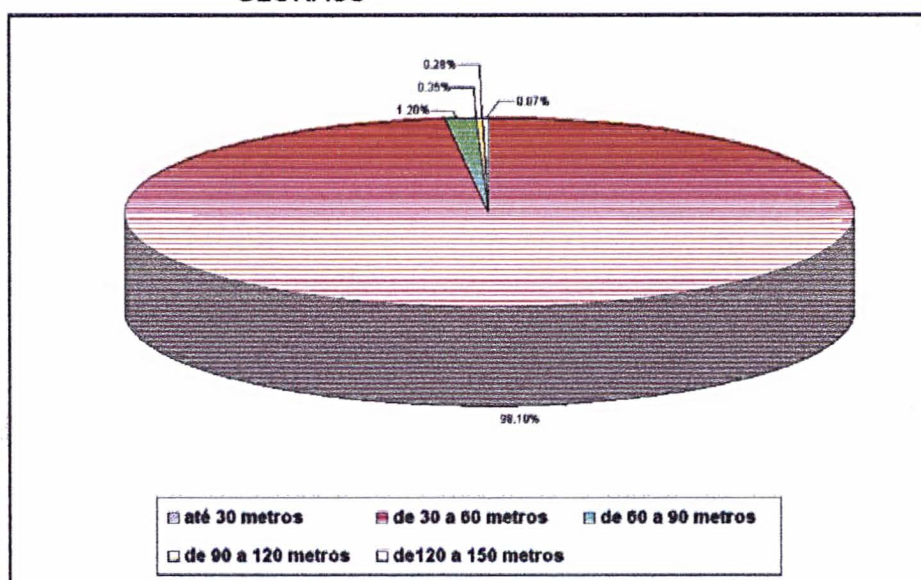


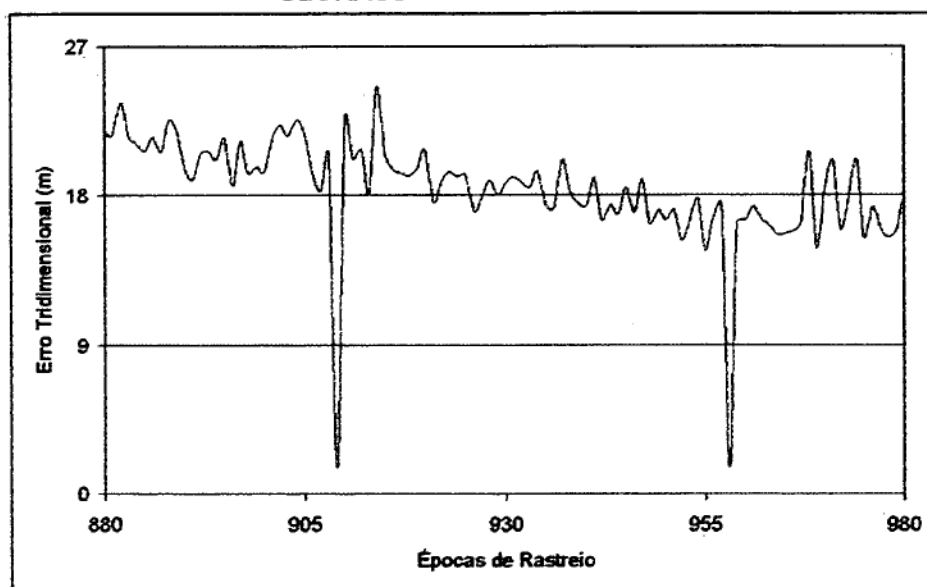
GRÁFICO 5.13 – CLASSES DE ERROS TRIDIMENSIONAIS PARA DADOS GLONASS



Nos gráficos 5.12 e 5.13 verifica-se que 95,50 % dos erros bidimensionais foram inferiores a 30 metros, enquanto que no caso dos erros tridimensionais não

ocorreram erros menores do que 30 metros, sendo que 98,10% dos erros ficaram no intervalo de 30 a 60 metros.

GRÁFICO 5.14 - ERRO TRIDIMENSIONAL OBTIDO COM DADOS GLONASS



Visando demonstrar a potencialidade do sistema GLONASS selecionou-se um trecho do arquivo de processamento no qual se obteve bons resultados. À partir deste arquivo gerou-se o gráfico 5.14. Nele mostra-se o erro tridimensional deste trecho, com disponibilidade de 6 a 7 satélites para rastreamento, compreendido entre as épocas 880 e 980, perfazendo um período total de rastreamento de 25 minutos. Os erros cometidos neste arquivo foram inferiores a 27 metros. No gráfico 5.14 verifica-se a existência de períodos em que o posicionamento com o GLONASS fornece qualidade superior àquela obtida com o GPS.

Os gráficos 5.15, 5.16 e 5.17 mostram, respectivamente, as diferenças das componentes ϕ , λ e H em relação às coordenadas de referência, calculadas à partir do processamento dos dados GPS. Nestes gráficos observa-se um comportamento mais homogêneo, quando comparado aos resultados obtidos com dados GLONASS. Tal comportamento pode ser atribuído à maior disponibilidade de satélites GPS, fato que permite a obtenção de uma melhor distribuição geométrica, principalmente em

função da constelação GPS estar completa⁶. Percebe-se também a existência de alguns picos, como por exemplo na época 1317, onde os erros cometidos nas componentes φ , λ foram superiores a 3 segundos de arco, e na componente H de aproximadamente 350 metros. Nesta época o fator PDOP assumiu valor acima de 3.

GRÁFICO 5.15 - DIFERENÇAS DE LATITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS

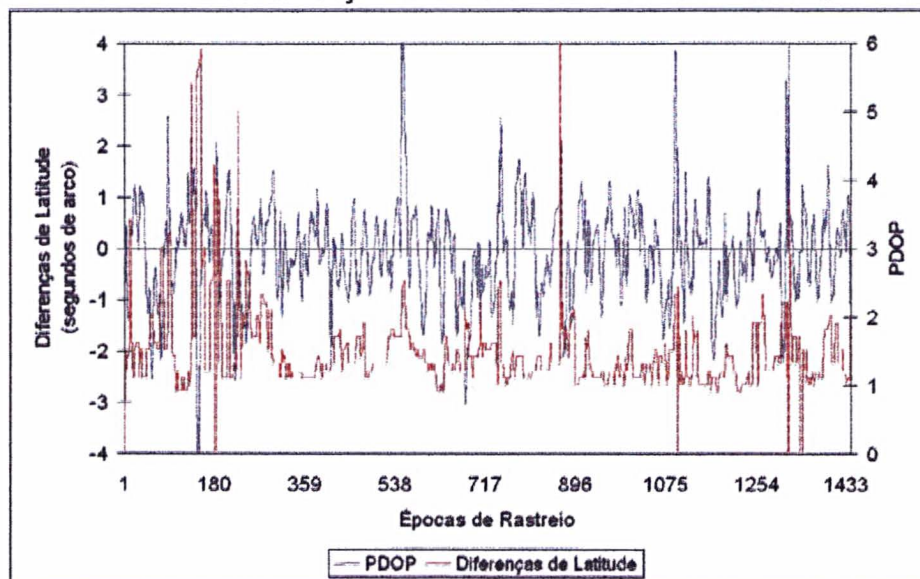
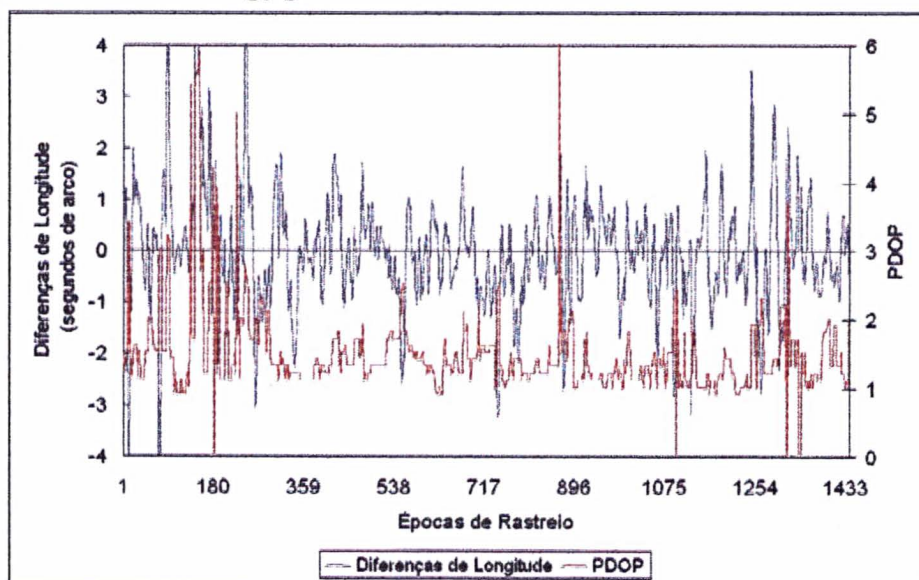
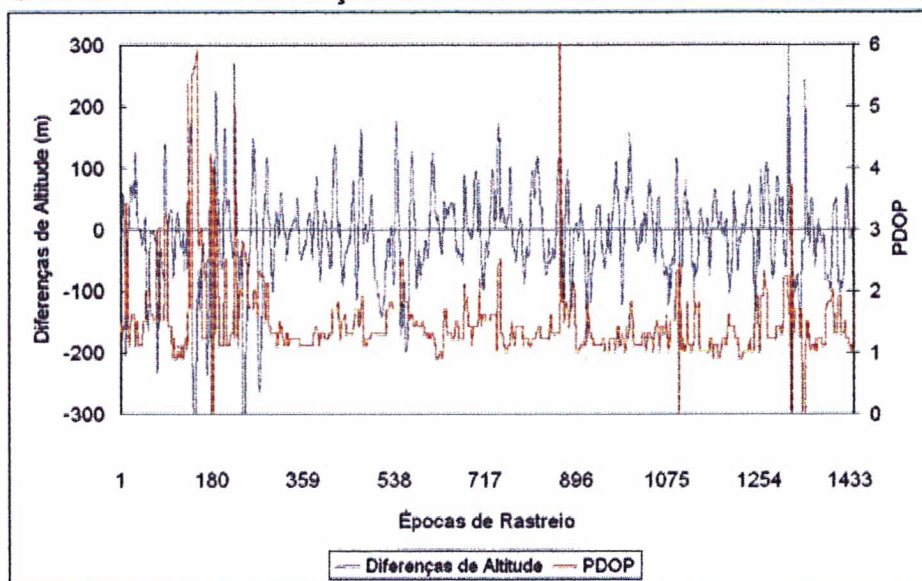


GRÁFICO 5.16 - DIFERENÇAS DE LONGITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS



⁶ O GPS atingiu o estágio de sistema completamente operacional em março de 1994, quando 24 satélites passaram a operar sem problemas (KRUEGER, 1996, p. 5).

GRÁFICO 5.17 - DIFERENÇAS DE ALTITUDE OBTIDAS COM DADOS GPS



Visando quantificar a amplitude dos erros bidimensionais e tridimensionais cometidos no processamento com dados GPS, foram gerados gráficos de porcentagem, empregando as mesmas intervalos de classes utilizados anteriormente para dados GLONASS e GPS/GLONASS. O gráfico 5.18 refere-se aos erros bidimensionais enquanto que o 5.19 aos erros tridimensionais.

GRÁFICO 5.18 – CLASSES DE ERROS BIDIMENSIONAIS PARA DADOS GPS

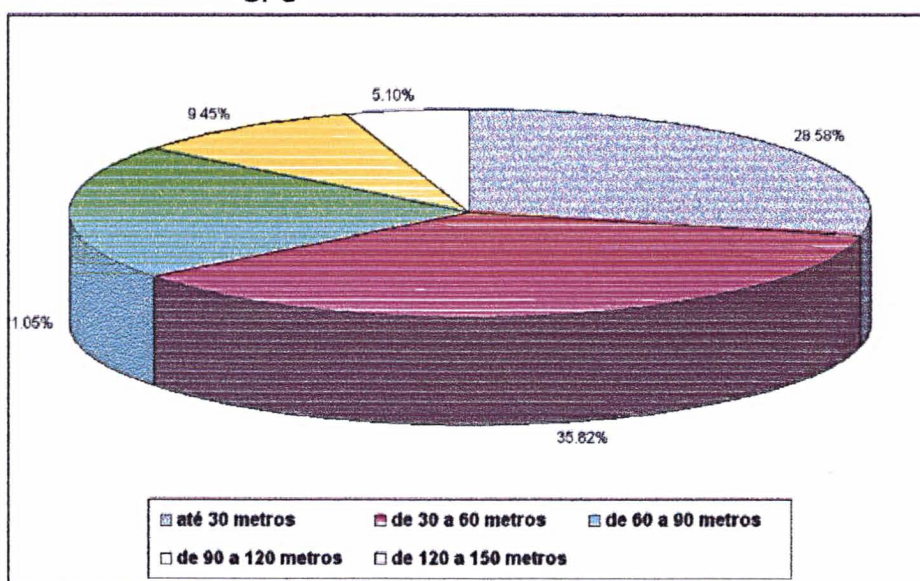
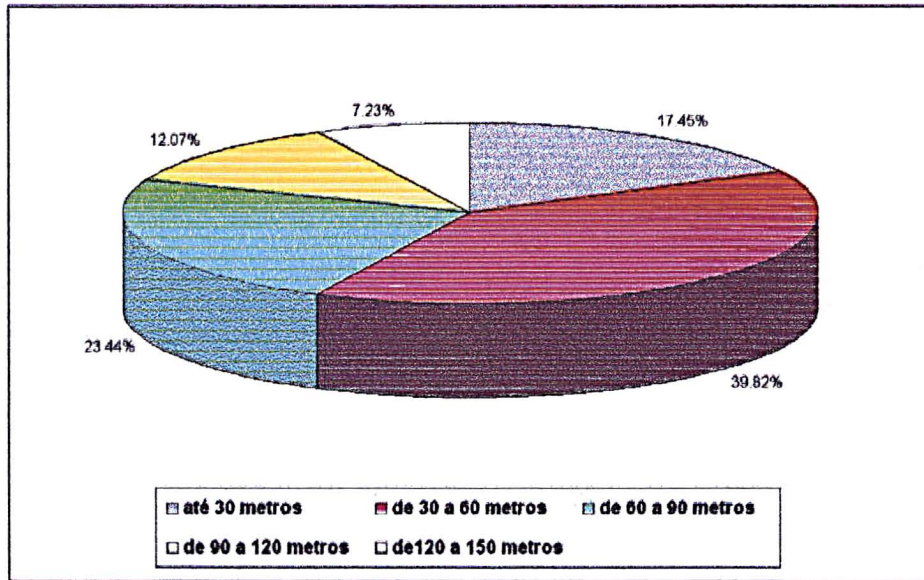


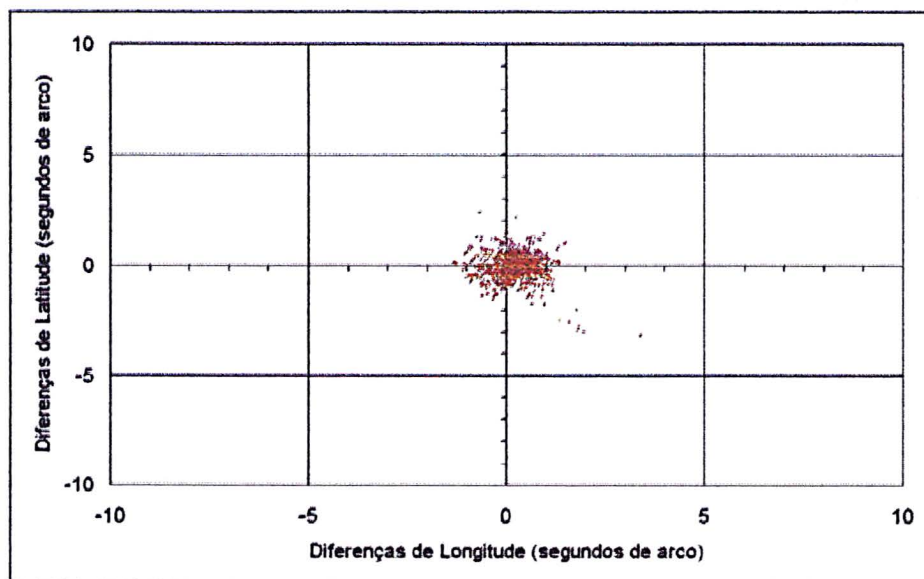
GRÁFICO 5.19 – CLASSES DE ERROS BIDIMENSIONAIS PARA DADOS GPS



Nos gráficos 5.18 e 5.19 observa-se que a maior parte dos erros cometidos (35,82% dos erros bidimensionais e de 39,82% dos erros tridimensionais) localizaram-se no intervalo entre 30 e 60 metros.

Nos gráficos 5.20, 5.21 e 5.22 mostra-se a dispersão dos erros cometidos em latitude e longitude, calculados à partir de diferenças entre as coordenadas instantâneas e as de referência, empregando dados GPS/GLONASS (gráfico 5.20), GLONASS (gráfico 5.21) e GPS (gráfico 5.22). Para o gráfico 5.20 tem-se um desvio

GRÁFICO 5.20 – DISPERSÃO EM FUNÇÃO DAS DIFERENÇAS EM LATITUDE E LONGITUDE COM DADOS GPS/GLONASS



padrão de 41,320 metros, para o gráfico 5.21 de 54,870 metros e para o gráfico 5.22 de 72,966 metros. Nos gráficos 5.20, 5.21 e 5.22 observou-se que a amplitude de variação pontual obtida com os dados GPS é maior quando comparada com a do GLONASS. Para os dados GPS/GLONASS fica claro que esta amplitude é menor que as anteriores em face do ganho com a combinação destes sistemas.

GRÁFICO 5.21 – DISPERSÃO EM FUNÇÃO DAS DIFERENÇAS EM LATITUDE E LONGITUDE COM DADOS GLONASS

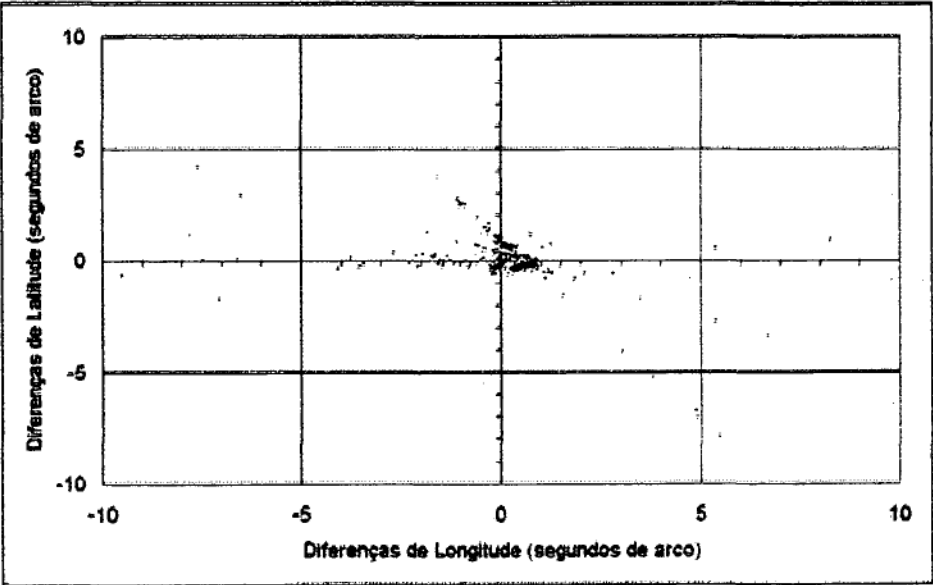
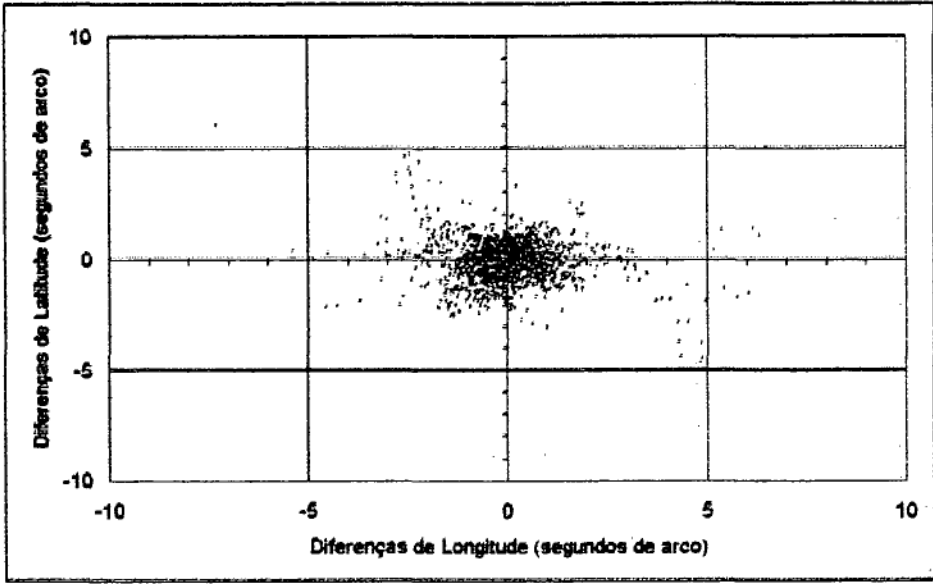


GRÁFICO 5.22 - DISPERSÃO EM FUNÇÃO DAS DIFERENÇAS EM LATITUDE E LONGITUDE OBTIDA COM DADOS GPS



À partir do processamento dos dados GPS, GLONASS e GPS/GLONASS, obteve-se valores finais para as coordenadas da estação RM03, indicadas na tabela 5.2.

TABELA 5.2 - COORDENADAS FINAIS OBTIDAS NO POSICIONAMENTO ABSOLUTO

DADOS	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
GPS/GLONASS	25°26'54,5293"S	49°13'52,4916"W	927,165 m
GLONASS	25°26'54,5091"S	49°13'52,5129"W	925,512 m
GPS	25°26'54,4932"S	49°13'52,1582"W	930,468 m

Na tabela 5.3 mostra-se as diferenças entre as coordenadas finais obtidas (tabela 5.2) e as coordenadas de referência.

TABELA 5.3 - DIFERENÇA ENTRE AS COORDENADAS DE REFERÊNCIA E AS FINAIS

DADOS	DX (m)	DY (mm)	DZ (m)
GPS/GLONASS	1,205	-8,629	3,380
GLONASS	1,837	-9,284	1,727
GPS	2,314	1,616	6,683

5.1.2 – Posicionamento Absoluto contendo Todos os Arquivos de Dados

Numa segunda análise realizada, com respeito ao posicionamento absoluto, foram utilizados 32 arquivos de dados com 12 horas de duração, contendo informações GPS e GLONASS. Por se tratar de um conjunto de dados composto por grande quantidade de informações, utilizou-se apenas as coordenadas finais, geradas à partir do processamento de cada arquivo de 12 horas. Esta análise foi realizada com o objetivo de verificar o comportamento do sistema GLONASS em função do tempo, válida pelo fato da sua constelação estar incompleta (seção 2.1), podendo ocorrer variações em termos de geometria, para cada dia rastreado.

As análises realizadas foram baseadas em gráficos, observando-se a amplitude de variação das coordenadas (coordenadas finais e coordenadas de referência). Foram gerados gráficos contendo suas variações, mostrando-se também o comportamento do PDOP e as quantidades mínima e máxima de satélites.

Nos gráficos 5.23 e 5.24 ilustra-se os erros tridimensionais calculados à partir de dados GLONASS, em função da quantidade de satélites e do PDOP, respectivamente. Percebe-se um comportamento mais discrepante, observando-se

variações entre 4 e 65 metros nos erros tridimensionais cometidos. Esta discrepância de resultados pode se atribuída às variações na geometria do GLONASS, causadas pelo fato da constelação do sistema estar incompleta. Outro

GRÁFICO 5.23 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE SATÉLITES, OBTIDO COM DADOS GLONASS

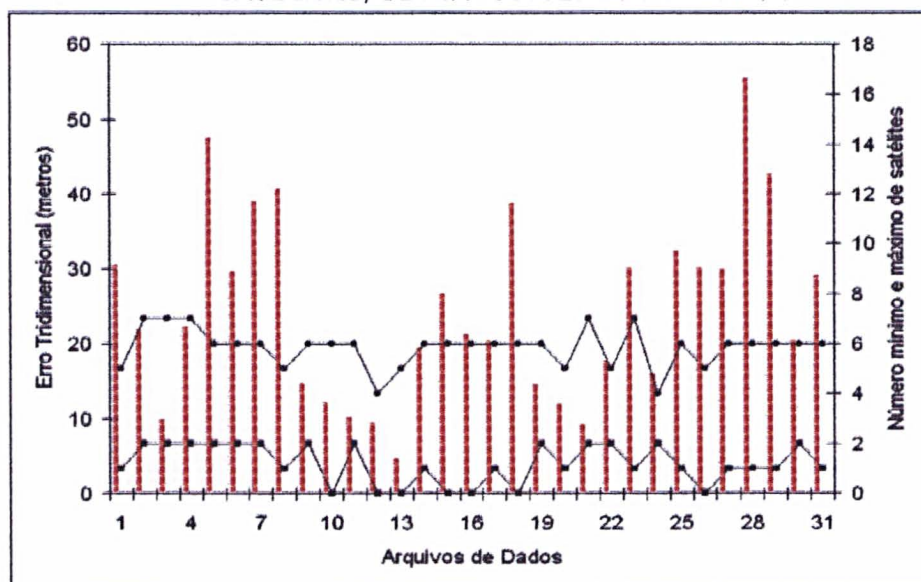
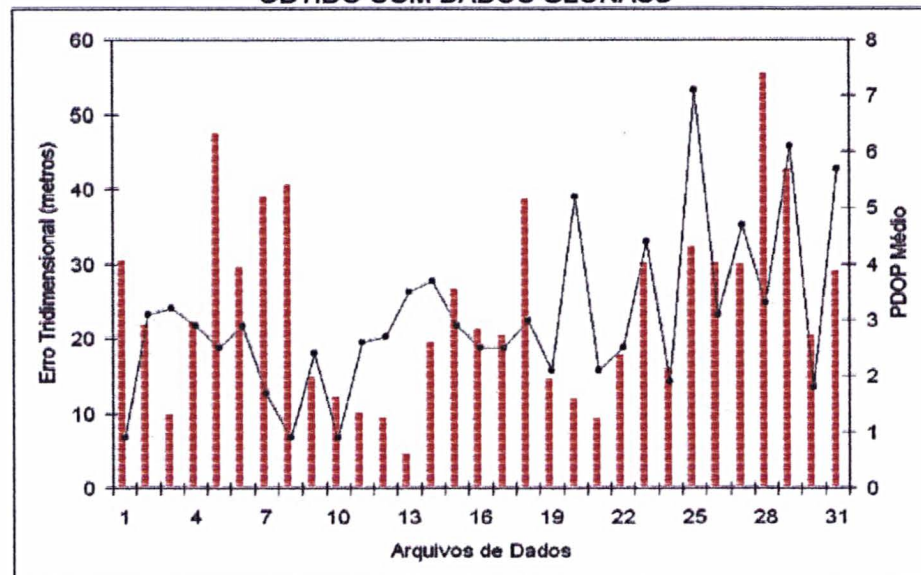


GRÁFICO 5.24 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO PDOP, OBTIDO COM DADOS GLONASS



fator a ser considerado são as constantes mudanças na quantidade de satélites do GLONASS, variável em função de novos lançamentos (tabelas 4.4, 4.2 e 4.3). De um modo geral pode-se dizer que os resultados obtidos superaram as expectativas,

visto que os erros cometidos foram inferiores aos estipulados para o posicionamento absoluto com o sistema GLONASS (seção 2.3).

Nos gráficos 5.25 e 5.26 mostra-se os erros tridimensionais obtidos à partir do processamento de dados GPS, em função da quantidade de satélites e do PDOP, respectivamente. Neste caso observou-se menores amplitudes de variação, comparativamente ao processamento dos dados GLONASS.

Neste caso, as maiores variações apresentadas ocorreram nos arquivos em que se dispunha de menores quantidades de satélites. No evento 9, por exemplo, verifica-se um erro tridimensional de 25,8 metros, com um mínimo de 5 e máximo de 9 satélites e fator de PDOP médio de 1,3. Posteriormente o erro passa para 15 metros, dispondo-se de 5 a 11 satélites e fator de PDOP médio de 1,5. No entanto, de uma forma genérica, considera-se que os resultados obtidos possuem boa qualidade, em função de estar se trabalhando em posicionamento absoluto, visto que os erros cometidos foram inferiores a 30 metros. Destaca-se ainda que, na época de execução dos levantamentos, a Disponibilidade Seletiva (SA) estava ativada.

GRÁFICO 5.25 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE SATÉLITES, OBTIDO COM DADOS GPS

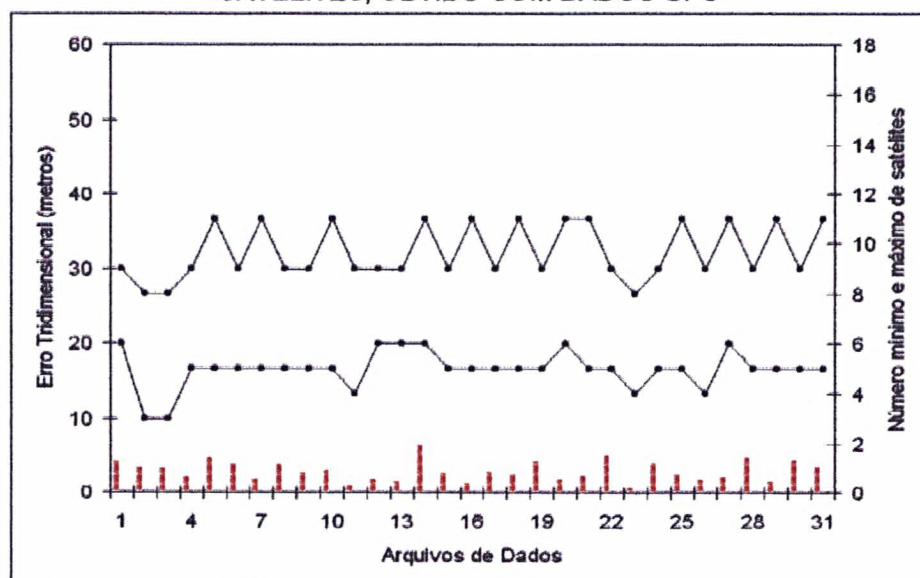
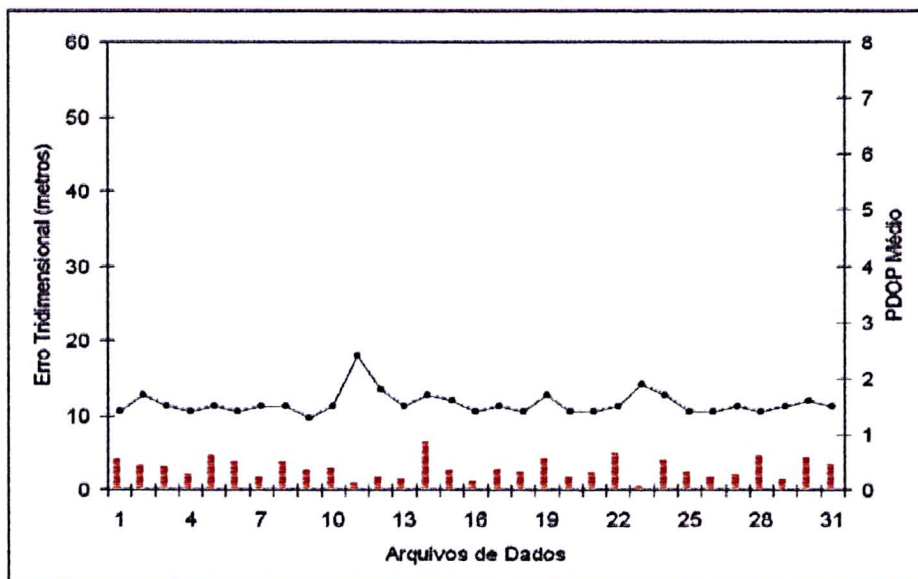


GRÁFICO 5.26 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO PDOP, OBTIDO COM DADOS GPS



Nos gráficos 5.27 e 5.28 observa-se os erros tridimensionais obtidos para dados GPS/GLONASS, em função da quantidade de satélites e do PDOP, respectivamente.

GRÁFICO 5.27 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE SATÉLITES, OBTIDO COM DADOS GPS/GLONASS

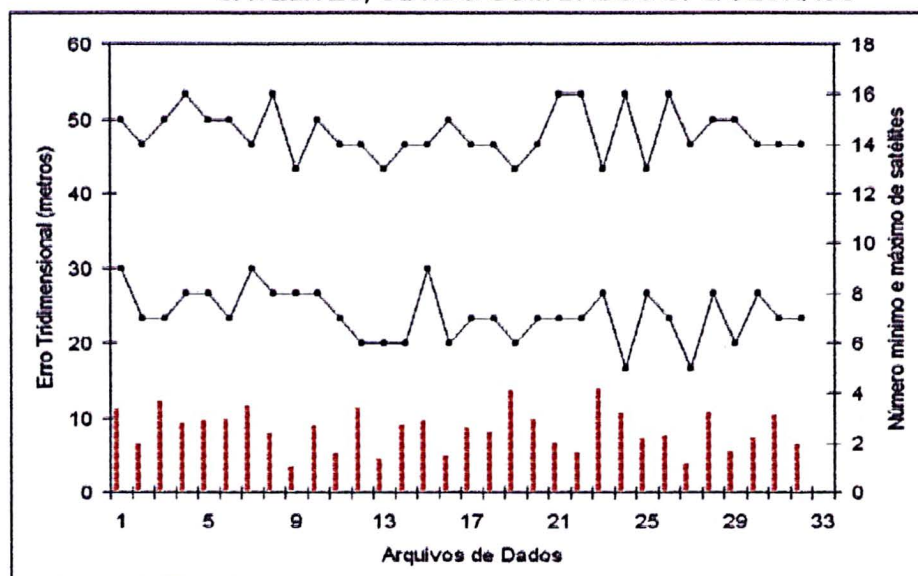
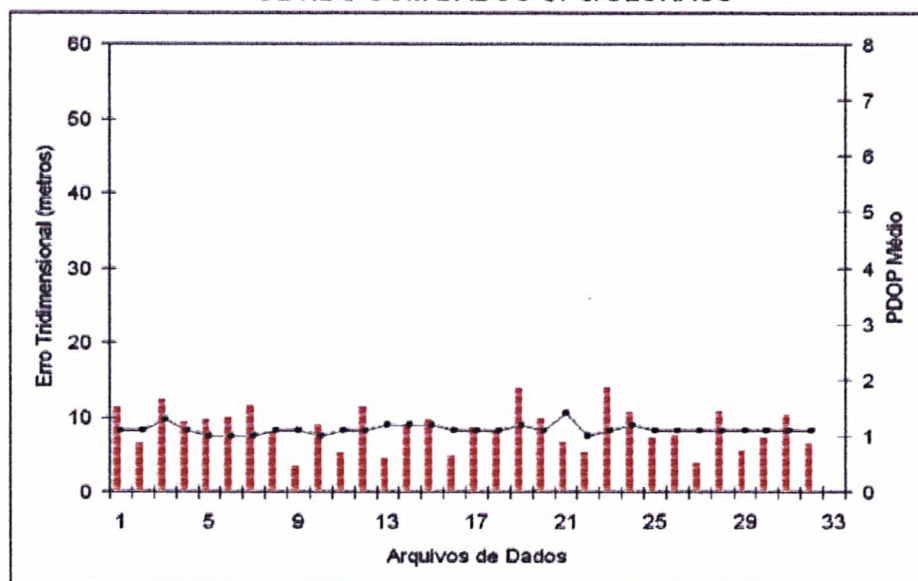


GRÁFICO 5.28 - ERRO TRIDIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO PDOP, OBTIDO COM DADOS GPS/GLONASS



Neste caso, os maiores erros tridimensionais cometidos foram inferiores a 15 metros, o que evidencia uma melhoria de precisão quando se faz a combinação dos sistemas GPS e GLONASS. Pode-se observar, nos gráficos 5.27 e 5.28, maior homogeneidade de resultados, comparativamente aos dos gráficos gerados para os posicionamentos com dados GPS (gráficos 5.25 e 5.26) ou GLONASS (gráficos 5.23 e 5.24). Atribui-se tal fato à maior quantidade de satélites presentes no caso do posicionamento combinado.

5.2 ANÁLISE DO POSICIONAMENTO RELATIVO

Os levantamentos empregando o método relativo, foram realizados na área teste do Laboratório de Geodésia Espacial, posicionando-se as estações RM01 e RM02, em relação à estação de referência RM03, conforme explicado no capítulo 4.

Foram realizados três experimentos distintos, mediante processamentos contendo as portadoras L1 e L2, somente a portadora L1 e os códigos C/A e P.

Para analisar o desempenho dos sistemas GPS e GLONASS nos diversos processamentos calculou-se diferenças entre as coordenadas UFPR das estações RM01 e RM02, e a suas respectivas coordenadas, obtidas dos levantamentos.

Foi utilizado o método de posicionamento estático, com tempo de rastreo de aproximadamente 2 horas e taxa de coleta de dados de 15 segundos. A análise de

resultados foi baseada na comparação de desempenho dos sistemas GPS e GLONASS, mediante o processamento dos dados obtidos com cada sistema isoladamente e com a sua combinação.

5.2.1 Processamento com as portadoras L1 e L2

Nas tabelas 5.4 e 5.5 indicam-se os resultados do processamento das linhas RM03-RM01 e RM03-RM02, apresentando as coordenadas finais e os seus respectivos desvios padrão, obtidos com o emprego de dados GLONASS, GPS e GPS/GLONASS, mediante o processamento realizado com as portadoras L1 e L2.

TABELA 5.4 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, UTILIZANDO AS PORTADORAS L1 E L2

	COORDENADAS	DESVIOS PADRÃO (mm)
GLONASS	25° 26' 53,32638"	14,60
	49° 13' 51,34204"	13,40
	925,2412 m	6,55
GPS	25° 26' 53,32641"	1,20
	49° 13' 51,34214"	1,56
	925,2278 m	6,41
GPS/GLONASS	25° 26' 53,32641"	3,36
	49° 13' 51,34214"	5,24
	925,2268 m	2,68

TABELA 5.5 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, UTILIZANDO AS PORTADORAS L1 E L2

	COORDENADAS	DESVIOS PADRÃO (mm)
GLONASS	25° 26' 54,54481"	5,78
	49° 13' 50,64753"	2,00
	924,4346 m	1,34
GPS	25° 26' 54,54481"	4,58
	49° 13' 50,64751"	5,20
	924,4879 m	2,30
GPS/GLONASS	25° 26' 54,54481"	4,25
	49° 13' 50,64752"	5,20
	924,4875 m	2,49

À partir das coordenadas geodésicas obtidas em cada processamento, calculou-se as suas diferenças em relação às coordenadas de referência, obtendo-se variações em segundos de arco. Com o intuito de obter estas variações em unidades métricas, utilizou-se o raio médio da Terra no ponto considerado, conforme descrito na seção 5.1.1. Desta forma, nas tabelas 5.6 e 5.7 são mostradas as

diferenças entre as coordenadas adotadas como referência e as obtidas do processamento das linhas RM03-RM01 e RM03-RM02.

TABELA 5.6 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM AS PORTADORAS L1 E L2

	Dφ (mm)	Dλ (mm)	DH (mm)	Erro Bi (mm)	Erro Tri (mm)
GLONASS	-11,7	23,4	-11,2	26,2	28,5
GPS	-12,6	20,3	2,2	23,9	24,0
GPS/GLONASS	-12,6	20,3	3,2	23,9	24,1

TABELA 5.7 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM AS PORTADORAS L1 E L2

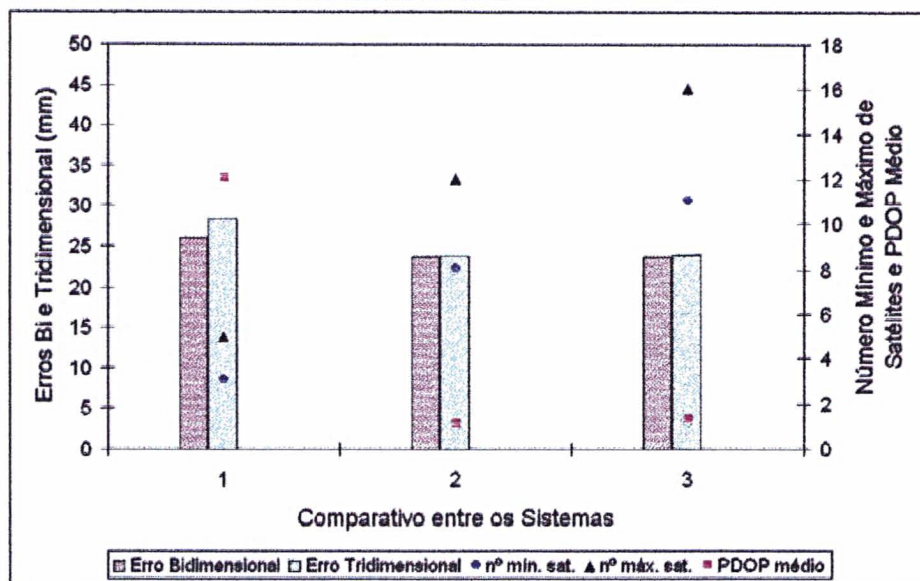
	Dφ (mm)	Dλ (mm)	DH (mm)	Erro Bi (mm)	Erro Tri (mm)
GLONASS	-18,7	5,2	10,4	19,4	22,0
GPS	-18,7	5,8	-42,9	19,6	47,2
GPS/GLONASS	-18,7	5,5	-42,5	19,5	46,8

Analisando as tabelas 5.6 e 5.7 verifica-se que os erros bidimensionais e tridimensionais cometidos nos processamentos das linhas RM03-RM01 e RM03-RM02 são semelhantes. Esta característica pode ser explicada pelo fato de que as linhas de base possuem aproximadamente a mesma extensão e a constelação de satélites ser a mesma nas duas estações de observação.

Com o intuito de melhor visualizar os resultados alcançados, foram gerados gráficos comparativos contendo os erros bidimensional e tridimensional, em função das quantidades mínima e máxima de satélites e do fator PDOP. As quantidades mínima e máxima de satélites apresentada é relativa aos seus respectivos valores, existentes durante todo o período de rastreo, enquanto que o fator PDOP é correspondente ao valor médio, calculado para o mesmo período de rastreo.

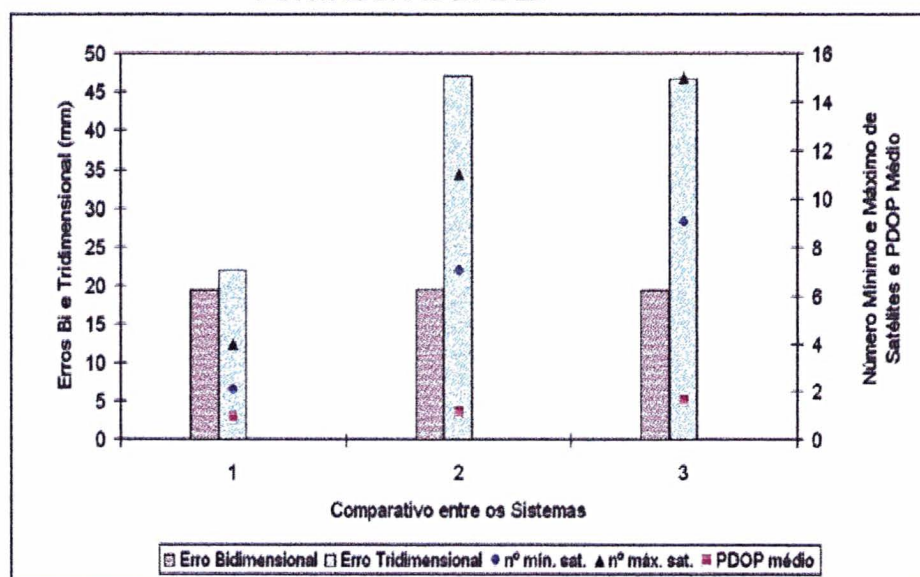
Nos gráficos 5.29 e 5.30 mostra-se os resultados alcançados no posicionamento das estações RM01 e RM02, com relação à estação base RM03. Os erros cometidos com o processamento de dados GLONASS, GPS e GPS/GLONASS são representados, respectivamente, através dos conjuntos (1), (2) e (3).

GRÁFICO 5.29 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM AS PORTADORAS L1 E L2



Da análise dos gráficos 5.29 e 5.30 constata-se que a constelação GLONASS, composta de uma quantidade de 1 a 4 satélites, apresentou diferenças significativas nos erros bidimensionais e tridimensionais cometidos na linha RM03-RM02, quando comparadas com as dos demais sistemas. No gráfico 5.25, percebe-se a presença de até 6 satélites, acarretando em erros bidimensionais e tridimensionais da mesma ordem que os demais sistemas.

GRÁFICO 5.30 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM AS PORTADORAS L1 E L2



5.2.2 Processamento com a portadora L1

Devido ao fato de estar se trabalhando com linhas de base de pequena extensão realizou-se outro experimento, utilizando apenas a portadora L1 nos processamentos. Os resultados obtidos para as linhas RM03-RM01 e RM03-RM02 são apresentados nas tabelas 5.8 e 5.9, respectivamente.

TABELA 5.8 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, UTILIZANDO A PORTADORA L1

	COORDENADAS	DESVIOS PADRÃO (mm)
GLONASS	25° 26' 53,32641"	1,20
	49° 13' 51,34204"	1,56
	925,2277 m	6,41
GPS	25° 26' 53,32641"	3,59
	49° 13' 51,34215"	5,04
	925,2269 m	2,89
GPS/GLONASS	25° 26' 53,32641"	3,50
	49° 13' 51,34213"	4,99
	925,2267 m	2,77

TABELA 5.9 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, UTILIZANDO A PORTADORA L1

	COORDENADAS	DESVIOS PADRÃO (mm)
GLONASS	25° 26' 54,55033"	8,35
	49° 13' 50,64980"	15,40
	924,2477 m	19,70
GPS	25° 26' 54,54482"	4,63
	49° 13' 50,64753"	5,91
	924,4368 m	2,46
GPS/GLONASS	25° 26' 54,54481"	4,15
	49° 13' 50,64753"	5,66
	924,4369 m	2,62

As diferenças em unidades lineares, obtidas do processamento com a portadora L1, estão indicadas nas tabelas 5.10 e 5.11, respectivamente para a linha RM03-RM01 e RM03-RM02.

TABELA 5.10 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM A PORTADORA L1

	Dφ (mm)	Dλ (mm)	DH (mm)	Erro Bi (mm)	Erro Tri (mm)
GLONASS	-12,6	23,4	2,3	26,6	26,7
GPS	-12,6	20,0	3,1	23,6	23,8
GPS/GLONASS	-12,6	20,6	3,3	24,1	24,4

TABELA 5.11 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM A PORTADORA L1

	Dφ (mm)	Dλ (mm)	DH (mm)	Erro Bi (mm)	Erro Tri (mm)
GLONASS	-188,4	-64,5	197,3	280,3	279,0
GPS	-19,1	5,2	8,2	21,4	21,0
GPS/GLONASS	-18,7	5,2	8,1	21,0	20,9

Analisando os resultados apresentados nas tabelas 5.10 e 5.11 verifica-se semelhanças nos processamentos de dados GPS e GPS/GLONASS, para as duas linhas de base estudadas. No caso do processamento de dados GLONASS os resultados obtidos nas duas linhas apresentaram bastante discrepâncias entre si. Tal fato pode ser explicado através da observação da quantidade de satélites GLONASS rastreados (gráfico 5.29) e o PDOP (gráfico 5.30) obtido em cada levantamento. No caso da linha RM03-RM01 a quantidade de satélites GLONASS variou entre 1 e 6, enquanto que o fator PDOP foi de 12. Na linha RM03-RM02 esta variação foi de 2 a 4 satélites com fator PDOP igual a 9. Baseando-se nestas informações, deve-se ressaltar que o número máximo de satélites disponíveis no levantamento da linha RM03-RM02 (4 satélites) proporciona apenas a configuração mínima necessária para se obter o posicionamento tridimensional, acarretando desta forma em uma degradação da precisão obtida.

Os gráficos 5.31 e 5.32 apresentam os erros bidimensional e tridimensional obtidos em função da quantidade de satélites e do fator PDOP no processamento das linhas RM03-RM01 e RM03-RM02, respectivamente. A metodologia de apresentação dos resultados é a mesma utilizada no processamento anterior.

GRÁFICO 5.31 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM A PORTADORA L1

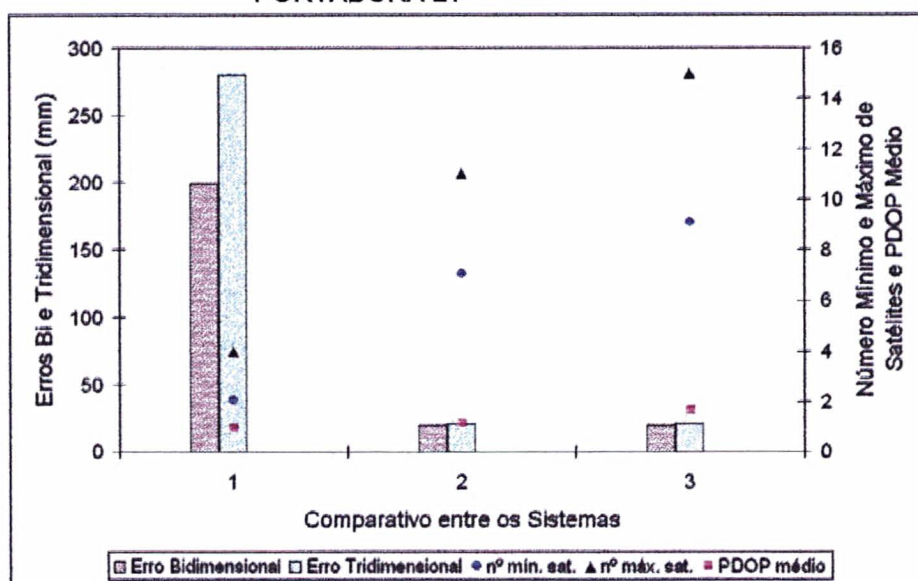
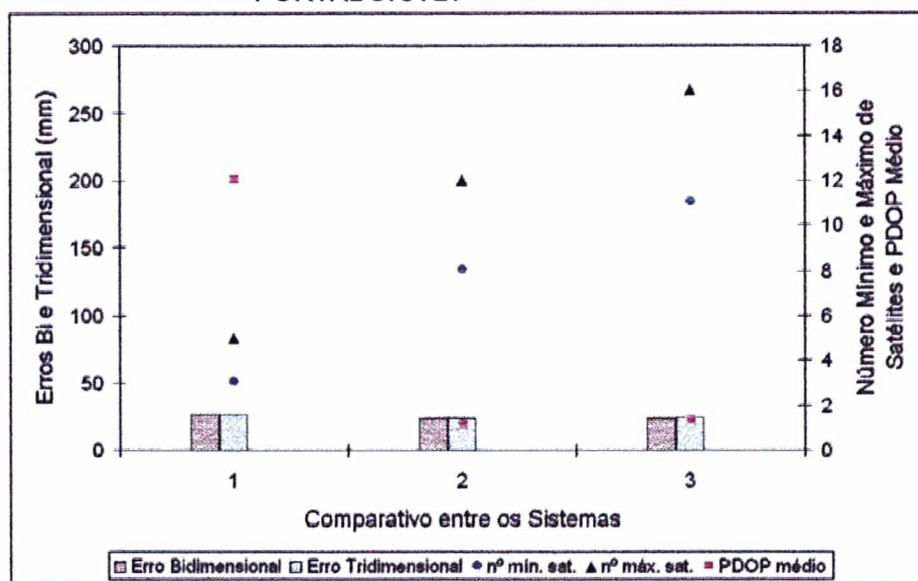


GRÁFICO 5.32 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM A PORTADORA L1



Comparando-se os gráficos 5.29 e 5.31 verifica-se que os erros cometidos são praticamente iguais em cada sistema indicado. Contudo os gráficos 5.30 e 5.32 apresentam situações diferentes para a linha de base RM03-RM02. Verifica-se para o sistema GLONASS, no processamento com as portadoras L1 e L2, obteve-se erros bidimensionais inferiores a 20 mm e tridimensionais inferiores a 25 mm. Para o processamento com a portadora L1 tem-se valores inferiores a 300 mm para os erros bidimensionais e tridimensionais. Para os sistemas GPS/GLONASS e GPS não ocorreram diferenças significativas entre os resultados obtidos com os processamentos com as portadoras L1 e L2 e somente L1.

5.2.3 Processamento com códigos C/A e P

No terceiro experimento realizado utilizou-se apenas os códigos C/A e P, com o intuito de comparar o desempenho dos sistemas GPS e GLONASS. As coordenadas finais e seus respectivos desvios padrão, obtidos neste experimento, são apresentados nas tabelas 5.12 e 5.13.

TABELA 5.12 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, UTILIZANDO OS CÓDIGOS C/A E P

	COORDENADAS	DESVIOS PADRÃO (mm)
GLONASS	25° 26' 53,32495"	14,60
	49° 13' 51,33804"	13,40
	924,8793 m	6,55
GPS	25° 26' 53,32755"	6,50
	49° 13' 51,34231"	1,79
	925,1640 m	9,55
GPS/GLONASS	25° 26' 53,32731"	5,66
	49° 13' 51,34121"	1,20
	925,0892 m	7,44

TABELA 5.13 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, UTILIZANDO OS CÓDIGOS C/A E P

	COORDENADAS	DESVIOS PADRÃO (mm)
GLONASS	25° 26' 54,55215"	3,99
	49° 13' 50,65115"	23,90
	924,8440 m	20,60
GPS	25° 26' 54,54505"	10,40
	49° 13' 50,64720"	1,33
	924,5157 m	7,97
GPS/GLONASS	25° 26' 54,54539"	9,08
	49° 13' 50,64744"	12,40
	924,5036 m	7,67

De forma análoga aos processamentos anteriores, foram calculadas as diferenças em unidades lineares, nas componentes ϕ , λ e H, bem como os erros bidimensional e tridimensional. Os resultados estão indicados nas tabelas 5.14, para a linha RM03-RM01 e 5.15 para a linha RM03-RM02.

TABELA 5.14 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01,COM OS CÓDIGOS C/A E P

	D ϕ (mm)	D λ (mm)	DH (mm)	Erro Bi (mm)	Erro Tri (mm)
GLONASS	32,3	146,3	350,7	149,8	381,4
GPS	-47,6	15,1	66,0	49,9	82,8
GPS/GLONASS	-40,3	48,9	140,8	63,4	154,4

TABELA 5.15 – PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02,COM OS CÓDIGOS C/A E P

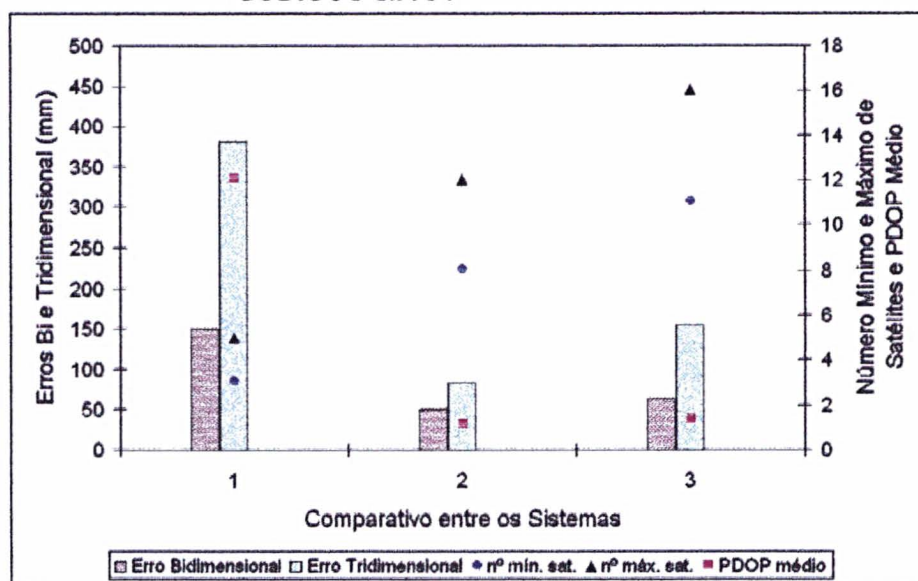
	D ϕ (mm)	D λ (mm)	DH (mm)	Erro Bi (mm)	Erro Tri (mm)
GLONASS	-244,3	-106,0	-399,0	266,3	479,7
GPS	-26,1	15,4	-70,7	30,3	76,9
GPS/GLONASS	-36,6	7,9	-58,6	37,4	69,5

Analisando os resultados apresentados nas tabelas 5.14 e 5.15 observa-se que o processamento com dados GLONASS forneceu pior qualidade que os demais, nas duas linhas de base pesquisadas. Novamente, devido à pequena quantidade de

satélites existentes no levantamento da linha RM03-RM02, as diferenças obtidas apresentaram maior amplitude. No que se refere ao processamento de dados GPS, obteve-se resultados semelhantes nas duas linhas de base, fato que pode ser atribuído à quantidade de satélites disponíveis nos dois levantamentos. No processamento de dados combinados GPS/GLONASS os resultados obtidos para a linha RM03-RM01 apresentaram pior qualidade do que os da linha RM03-RM02. Destaca-se que a quantidade de satélites GPS/GLONASS rastreados, na linha RM03-RM01 foi de 11 a 16, com fator PDOP de 1,3. Na linha RM03-RM02 esta quantidade variou entre 9 e 15 satélites, com fator PDOP de 1,6.

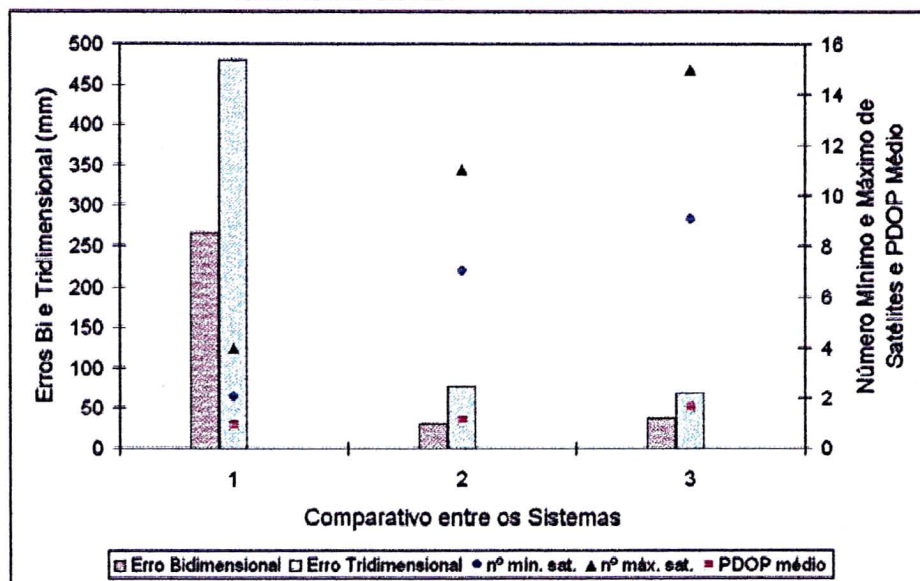
Com o intuito de melhor visualizar os erros cometidos, apresenta-se nos gráficos 5.33 e 5.34 os erros bidimensional e tridimensional obtidos em função da quantidade de satélites e do fator PDOP, respectivamente no processamento das linhas RM03-RM01 e RM03-RM02.

GRÁFICO 5.33 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM01, COM OS CÓDIGOS C/A e P



No processamento com os códigos observa-se que os erros cometidos apresentaram maior amplitude quando comparados com os processamentos anteriores. Verifica-se que os resultados fornecidos pelo GLONASS apresentaram erros superiores aos demais sistemas, para as duas linhas de base processadas.

GRÁFICO 5.34 - PROCESSAMENTO DA LINHA RM03-RM02, COM OS CÓDIGOS C/A E P



Na linha RM03-RM01 (gráfico 5.33) os erros bidimensionais, no caso do GLONASS, atingiram 150 mm, enquanto que os tridimensionais foram passaram de 350 mm. No caso do GPS os erros bidimensionais e tridimensionais foram inferiores a 100 mm. No processamento GPS/GLONASS os erros tridimensionais cometidos foram de aproximadamente 150 mm.

Na linha RM03-RM02 (gráfico 5.34) o processamento com dados GLONASS forneceu erro bidimensional inferior a 300 mm e tridimensional inferior a 500 mm. O processamento dos dados GPS, bem como GPS/GLONASS forneceu erros bidimensionais e tridimensionais inferiores a 100 mm.

5.2.4 Comparação entre os resultados obtidos nas linhas de base RM03-RM01 e RM03-RM02

Fazendo uma análise comparativa dos resultados obtidos nas linhas RM03-RM01 e RM03-RM02 verifica-se comportamentos distintos. No processamento contendo as portadoras L1 e L2 os resultados obtidos foram semelhantes, conforme pode ser observado nas tabelas 5.6 e 5.7. No processamento com a portadora L1 (tabelas 5.10 e 5.11), no caso dos sistemas GPS/GLONASS e GPS, os erros bidimensionais e tridimensionais obtidos apresentaram aproximadamente a mesma amplitude. No caso do GLONASS o processamento das duas linhas de base

apresentaram comportamentos distintos. Na linha RM03-RM02 os erros bidimensionais e tridimensionais obtidos foram inferiores a 280 mm, enquanto que na linha RM03-RM01 tais erros foram de aproximadamente 30 mm. No processamento com os códigos (gráficos 5.33 e 5.34) verifica-se, nas duas linhas de base, que o sistema GLONASS apresentou os maiores erros, quando comparado aos demais sistemas. Com os sistemas GPS/GLONASS e GPS observou-se situações distintas nas duas linhas de base. Na linha RM03-RM01 o sistema GPS forneceu melhores resultados que o GPS/GLONASS, verificando-se também neste caso erros com maior amplitude. Na linha RM03-RM02 observou-se maior homogeneidade entre os valores obtidos com os sistemas GPS e GPS/GLONASS.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Com este trabalho procurou-se mostrar a viabilidade prática da aplicação conjunta dos sistemas GPS e GLONASS, através do estudo dos aspectos envolvidos na sua compatibilização, no que se refere aos levantamentos geodésicos. Tal estudo é embasado nas vantagens oferecidas com o uso combinado GPS/GLONASS, em função da maior disponibilidade de satélites. A redundância proporcionada, teoricamente, permite melhor desempenho tanto em áreas urbanas quanto naquelas em que existe cobertura florestal, devido à maior quantidade de satélites visíveis nas porções desobstruídas do céu. Com o intuito de evidenciar estas vantagens, foram realizados diversos experimentos envolvendo os posicionamentos absoluto e relativo.

No posicionamento absoluto contendo apenas um arquivo de dados observou-se que o processamento combinado GPS/GLONASS apresentou menor dispersão (desvio padrão) quando comparado com os processamentos isolados, com dados GLONASS e GPS. Tal situação foi verificada nos gráficos 5.20, 5.21 e 5.22, respectivamente. Verificou-se também melhor desempenho do GLONASS em partes selecionadas do arquivo de dados (com boa geometria e quantidade suficiente de satélites), conforme demonstrado no gráfico 5.14.

No posicionamento absoluto contendo todos os arquivos de dados procurou-se ilustrar a repetibilidade de resultados no processamento de dados dos sistemas GPS, GLONASS e GPS/GLONASS. No processamento do GLONASS observou-se resultados mais heterogêneos, ocorrendo maior dispersão de valores entre os diversos arquivos analisados. Verificou-se também a presença de erros tridimensionais com maior valor numérico no sistema GLONASS, quando comparado aos demais sistemas. Os melhores resultados obtidos, em termos de repetibilidade e amplitude, foram aqueles advindos do processamento GPS.

De um modo geral pode-se dizer que no posicionamento absoluto a integração GPS/GLONASS proporcionou melhores resultados, fornecendo desvio padrão de 41,320 metros. Nos processamentos isolados, o GLONASS apresentou melhor desempenho, obtendo-se desvio padrão de 54,870 metros, enquanto que no

GPS obteve-se 72,966 metros. À partir dos valores obtidos conclui-se que o GLONASS, apesar de estar com a sua constelação incompleta, pode fornecer bom desempenho, superior inclusive ao do GPS em algumas situações, desde que se disponha de uma configuração mínima, em termos de geometria e quantidade de satélites. Dentro deste contexto deve-se ressaltar que o sistema GPS estava sujeito aos efeitos da Disponibilidade Seletiva no período em que foram realizados os levantamentos em posicionamento absoluto. Deste modo a precisão preconizada para este sistema fornecia qualidade inferior que a do GLONASS.

No posicionamento relativo, foram analisadas duas linhas de base com aproximadamente a mesma extensão. As análises realizadas foram embasadas nos processamentos com as portadoras L1 e L2, portadora L1 e com os códigos.

O sistema GPS proporcionou resultados semelhantes, tanto na linha RM03-RM01 quanto na RM03-RM02, obtendo-se resultados coerentes em termos da utilização das portadoras L1 e L2 (tabelas 5.7 e 5.8) , portadora L1 (tabelas 5.10 e 5.11) e códigos (tabelas 5.14 e 5.15). Os valores obtidos são resultantes da utilização de uma constelação completa, dispondo-se de geometria e quantidade de satélites suficientes para realizar o posicionamento tridimensional. Deve-se ressaltar também que os levantamentos empregando o método relativo foram realizados após o desligamento da Disponibilidade Seletiva, de modo que o sistema GPS passou a oferecer melhor qualidade.

No processamento dos dados GLONASS obteve-se situações distintas para as linhas de base RM03-RM01 e RM03-RM02. Na linha RM03-RM01 não ocorreram diferenças significativas entre os processamentos com L1 e L2 e somente L1, obtendo-se os erros bidimensionais inferiores a 30 mm (disponibilidade de 1 a 6 satélites e PDOP de 12). Na linha RM03-RM02 os erros bidimensionais cometidos foram inferiores a 25 mm e 280mm (disponibilidade de 2 a 4 satélites e PDOP de 9) nos processamentos com L1 e L2 e somente L1, respectivamente. Dos resultados alcançados pode-se concluir que a disponibilidade em termos de quantidade e geometria dos satélites rastreados apresenta influência sobre o desempenho do sistema GLONASS.

No caso do sistema GPS/GLONASS obteve-se comportamentos semelhantes nos processamentos L1 e L2 e somente L1, para as duas linhas de base. No processamento com os códigos o processamento GPS/GLONASS foi o

que proporcionou os melhores resultados para a linha de base RM03-RM02 (tabela 5.15).

Com base nos valores obtidos nos posicionamentos relativos conclui-se que a disponibilidade e consequentemente a geometria dos satélites GLONASS tiveram grande influência sobre os resultados obtidos, conforme foi verificado nos três processamentos realizados. No caso do sistema GPS não houveram variações significativas entre os processamentos das duas linhas de base, em função da configuração dos satélites apresentar as mesmas características nos dois levantamentos.

Constatou-se também, no posicionamento relativo, que a integração de dados GPS/GLONASS nem sempre ofereceu os melhores resultados, ao contrário do que ocorreu com o posicionamento absoluto. Esta situação pode ser explicada pelo fato dos dois levantamentos terem sido realizados em períodos diferentes, ocorrendo mudanças em termos de quantidade e distribuição, na constelação de satélites GLONASS. Deste modo, observando-se os resultados obtidos tanto no posicionamento absoluto quanto no relativo, conclui-se que a combinação de dados GPS e GLONASS, só apresenta vantagens quando dispõe-se de uma configuração adequada de satélites GLONASS, que possibilite a obtenção de geometria favorável e quantidade mínima de satélites.

Deve-se ressaltar que apesar das incertezas à respeito da continuidade do sistema GLONASS, o mesmo vem recebendo incentivos, mediante a realização de campanhas internacionais (campanha IGEX), ampliação do formato RINEX possibilitando a utilização de dados GLONASS e a realização de diversas pesquisas pela comunidade científica internacional à respeito do sistema. Destaca-se também que recentemente foram realizados novos lançamentos de satélites, melhorando a sua distribuição entre os planos orbitais.

Com respeito à Disponibilidade Seletiva (SA), deve-se destacar que apesar desta técnica de degradação ter sido desativada no dia 1º de maio de 200, tal medida não é permanente. Esta condição será adiada anualmente, estando garantida até 2006 (DIVIS, 2000). Dentro deste contexto deve-se destacar que, nos experimentos realizados, verificou-se melhorias significativas de desempenho, na associação GPS/GLONASS, quando a SA estava ativada. Por outro lado, nos levantamentos em que esta técnica de degradação estava desativada, obteve-se

desempenhos semelhantes, tanto nos posicionamentos GPS/GLONASS quanto nos GPS.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Com o intuito de realizar uma análise mais detalhada sobre o comportamento do sistema GLONASS, são necessários novos experimentos, empregando-se linhas de base com maior extensão, do que as utilizadas neste trabalho. A realização deste experimento visa comprovar a existência de diferenças mais significativas entre os sistemas GPS, GLONASS e GPS/GLONASS.

Realizar levantamentos em locais afetados por obstruções, tais como em centros urbanos e áreas com cobertura florestal, com o intuito de comprovar se ocorrem vantagens na associação GPS/GLONASS nestes locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASLOV, Y. A., GALAZIN, V. F. KAPLAN, B. L., MAKSIMOV, V. G. & ROGOSIN, V. P. GLONASS to GPS – A New Coordinate Transformation, GPS World, Vol. 10, nº 1, pp. 54-58, 1999.

BESER, J. & HAUNSCHILD, M. Advantages of Integrated GPS/GLONASS Operations, GIM, nov. 95, vol. 9.

BLITZKOW, D. Aspectos Gerais do Sistema NAVSTAR/GPS. Universidade de São Paulo; Escola Politécnica; Departamento de Engenharia de Transportes; Dezembro; 1995.

CARVALHO, L. D. Análise das Técnicas Atuais para os Posicionamentos Estáticos e Cinemáticos em Bases Curtas, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, 1999.

CSIC, GLONASS Interface Control Document, Coordination Scientific Information Center, Moscow, 1998.

CUNNINGHAM, SWIFT, MUELLER, Improvement of the NIMA Precise Orbit and Clock Estimates, ION-GPS, 1999

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, J.; COLLINS, J. GPS: Theory and Practice, 3.ed. New York: Springer Verlag Wien, 1994.

FEAIRHELLER, S. The Russian GLONASS System: A US Air Force/Russian Study, Proceedings of ION GPS-1994, Institute of Navigation, pp. 293-304, 1994.

GPS Interface Control Document (ICD-GPS-200), ARINC Research Corporation, 1991.

GURTNER, W. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2, Astronomical Institute, University of Berne, 1997.

HABRICH, H. Double Difference Ambiguity Resolution for GLONASS/GPS Carrier Phase, Proceedings of ION GPS-1999, Institute of Navigation, Nashville, TN, pp. 1609-1618, 1999.

HABRICH, H. BKG IGEX Analysis Report, IGEX Eletronic Mail Message nº 0719, International GLONASS Experiment, 2000.

HAN, S., DAI, L., RIZOS, C. A New Data Processing Strategy for Combined GPS/GLONASS Carrier Phase-Based Positioning, Proceedings of ION GPS-1999, Institute of Navigation, Nashville, TN, pp. 1619-1627, 1999.

JONG, C. D.; JONKMAN, N. F. A Permanent GPS/GLONASS Reference Station in The Netherlands, Proceedings of International Conference on "Integrated Navigation Systems", St. Petersburg, Russia, 24-26 May, 1999.

KRUEGER, C. P. Investigações Sobre Aplicações de Alta Precisão do GPS no Âmbito Marinho, Tese de Doutorado, Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, 1996.

LANGLEY, R. B. GLONASS: Review and Update, GPS World, pp. 46-51, july, 1997.

LEICK, A. GLONASS Satellite Surveying, Journal of Surveying Engineering, pp. 91-99, may-1998.

LEICK, A., LI, J., BESER, J., MADER, G. Processing GLONASS Carrier Phase Observations – Theory and First Experience, Proceedings of ION GPS-1995, Institute of Navigation, Nashville, TN, pp. 1041-11047, 1995.

LEWANDOWSKI, W.; AZOUBIB, J., GPS+GLONASS: Toward Subnanosecond Time Transfer, GPS World, pp. 30-39, Nov., 1998.

MISRA, P. N.; ABBOT, R. I., SGS-85 – WGS-84 Transformation, Manuscripta Geodaetica, Vol. 19, pp. 300-308, 1994.

MISRA, P. N., ABBOT, R. I., GAPOSCHKIN, E. M., Integrated use of GPS and GLONASS: transformation between WGS-84 and PZ-90, Proceedings of ION GPS-1996, Institute of Navigation, Kansas City, Mi, pp. 307-314, 1996.

MISRA, P. et. al. GLONASS Performance: Measurement Data Quality and System Upkeep, Proceedings of ION GPS-1996, Institute of Navigation, Kansas City, Mi, pp. 261-270, 1996.

MONICO, J. F. G. Modelos Matemáticos Envolvidos na Integração GLONASS e GPS, Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Cartografia, pp. Xx-xx, Recife, 1999.

PRATT, M., BURKE, B., MISRA, P. Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS-GLONASS L1-L2 Data, Proceedings of ION GPS-1998, Institute of Navigation, Nashville, TN, pp. 389-398, 1998.

RABY, P., DALY, P., Integrated GPS/GLONASS Navigation: Algorithms and Results, Proceedings of ION GPS-1993, Institute of Navigation, Salt Lake City, pp. 161-170, 1993.

RAPOPORT, L. General Purpose Kinematic/Static GPS/GLONASS Postprocessing Engine, Proceedings of ION GPS-1997, Institute of Navigation, Kansas City, pp.1757-1765, 1997.

ROSSBACH, U., HABRICH, H., ZARROA, N. Transformation Parameter Between PZ-90 and WGS-84, Proceedings of ION GPS-1996, Institute of Navigation, Kansas City, Mi, pp. 279-284, 1996.

ROSSBACH, U., HEIN, G. W., Treatment of Integer Ambiguities in DGPS/DGLONASS Double Difference Carrier Phase Solutions, Proceedings of ION GPS-1996, Institute of Navigation, Kansas City, Mi, pp. 909-916, 1996.

SANTOS, M. C. INTEGRAÇÃO ENTRE GPS E GLONASS, Boletim de Ciências Geodésicas, vol. 6, nº 2, pp. 15-24, 2000.

SANTOS, M. C. et. al., GPS e GLONASS: Parceria de Futuro, InfoGeo, pp. 45-46, julho/agosto, 1998.

SANTOS, M. C. NAVSTAR/GPS: Aspectos Teóricos e Aplicações Geofísicas, Dissertação de Mestrado, Observatório Nacional, 1990.

SEEBER, G. Satellite Geodesy: Foundations, methods and applications, Berlin – New York, 1993.

SLATER, J. A. & MALYS, S. WGS-84 – Past, Present and Future, Proceedings of ION GPS-97, Institute of Navigation, Kansas City, Mi.

WALSH, D.; DALY, P. Precise Positioning Using GLONASS, GIM, Novembro, 1998,

WANG, J. Mathematical Models for Combined GPS and GLONASS Positioning, Proceedings of ION GPS-1998, Institute of Navigation, Nashville, TN, pp. 1333-1344, 1998.

WILLIS, P. et. al., The IGEX-98 Campaign: Highlights and Perspective, International Association of Geodesy Symposia, Vol. 121, pp. 22-31, 2000.

ZARROA, N., MAI, W., SARDON, E. & JUNGSTAND, A. Preliminary Evaluation of the Russian GLONASS System as a Potential Geodetic Tool, Journal of Geodesy, Vol. 72, nº 6, pp. 356-363, 1998.